



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JAAKKO LUOMA

LIIKE-, TOIMISTO- JA KOULURAKENNUKSIEN SÄHKÖKUORMAT
KYSYNNÄN JOUSTON RESERVEINÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti Järven-
tausta

Tarkastaja ja aihe hyväksytty

Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 4. helmi-
kuuta 2015

TIIVISTELMÄ

JAAKKO LUOMA: Liike-, toimisto- ja koulurakennuksien sähkökuormat kysynnän jouston reserveinä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 75 sivua, 14 liitesivua

Maaliskuu 2015

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: Professori Pertti Järventausta

Avainsanat: kysynnän jousto, kiinteistöautomaatio, älykkäät sähköverkot, ilmanvaihto, valaistus

Uusiutuvan energiantuotannon yleistymisen sekä sähköön tuotannon ja kulutuksen vaihtelut lisäävät tarvetta sähkövoimajärjestelmän joustolle. Kulutuksen mukautuminen eri kuormitustilanteissa mahdollistaisi taloudellisen vaihtoehdon lisätä järjestelmän joustavuutta. Sähkökuormien ohjaamista tässä tarkoituksessa kutsutaan kysynnän joustoksi. Työssä selvitettiin ilmanvaihdon ja valaistuksen soveltuvuutta kysynnän joustoon. Keskeisimpinä tutkimuskysymyksinä oli selvittää liike-, toimisto- ja koulurakennuksien kiinteistökuormien soveltuvuutta kysynnän joustoon sekä millaisia ohjaustapoja ja -järjestelmiä voitaisiin hyödyntää kysynnänjouston toteutuksessa näissä kiinteistöissä.

Työn soveltavassa osassa kuormien soveltuvuutta kysynnän joustoon tutkittiin käytännön kenttäkokein käytössä olevassa koulurakennuksessa. Ilmanvaihdon soveltuvuutta tutkittiin pudottamalla ilmanvaihdon tehoa hetkellisesti sekä mittaamalla tilojen ilmanlaadun olosuhteita. Säädetävän valaistuksen tasoa pudotettiin valaistusohjausjärjestelmän avulla ja ohjauksen vaikutuksia arvioitiin mittaamalla tilojen valaistusvoimakkuuksia sekä käyttäjäkyselyllä.

Tulokset osoittavat, että molemmat järjestelmät soveltuvan kysynnän joustoon. Ilmanvaihtokoneiden ilmamäärä pystyttiin pudottamaan noin 40 %:iin normaalista ilmamäärästä, jolloin saavutettu tehopudotus oli noin 75 %, ilman merkittävää haittaa tilojen olosuhteisiin. Kuuden ilmanvaihtokoneen pudottaminen osailmamäärälle mahdollisti käyttöaikana noin 18 – 20 kW ohjauspotentiaalin. Tehopudotus oli mahdollista toteuttaa ohjaushetkestä nopeimmillaan noin 10 – 15 sekunnissa. Suhteutettuna tämä koko rakennusosan bruttoalaan se tarkoittaa noin 2,5 – 3 W/m². Valaistuksen pudottamisen 30 % normaalista valaistustasosta havaitsi vain neljännes koeryhmästä eikä muutoksia pidetty kuin hieman häiritsevinä. Säädetävän sisävalaistuksen joustopotentiaalia koko rakennusosassa arvioitiin olevan käyttöaikana arviolta noin 3 – 6 kW, mikä olisi mahdollista toteuttaa huomaamattomasti noin 30 sekunnissa ohjauskäskystä. Bruttopintaalaan suhteutettuna tämä tarkoittaa noin 0,5 – 1,0 W/m².

Tutkimuksen perusteella liike-, toimisto- ja koulurakennuksien ilmanvaihto ja valaistusjärjestelmien sähkökuormia voitaisiin hyödyntää kysynnän jouston reservimarkkinoilla kiinteistöautomaatiojärjestelmien ohjaamana. Nykyiset talotekniset järjestelmät mahdollistaisivat kiinteistökuormien käyttöönoton kysynnän joustoon jo tällä hetkellä, mutta perinteiset toteutusratkaisut eivät huomioi kysynnän jouston näkökulmaa. Jotta kyseiset rakennustyytit saataisiin osallistumaan kysynnän joustoon, tulisi siihen kuuluvista toiminnallisuuksista ja käytännön ratkaisuista toteuttaa selkeät ja yksinkertaiset suositukset suunnitteluun ja järjestelmien toteutukseen.

ABSTRACT

JAAKKO LUOMA: Utilizing the electric loads of commercial, office and school buildings in fast demand response

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 75 pages, 14 Appendix pages

March 2015

Master's Degree Programme in Electric Engineering

Major: Alternative Electric Energy Technology

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: demand response, building automation, smart grid, ventilation, lighting

More frequent use of renewable energy production as well as fluctuation of electricity production and consumption increase the need for flexibility of the power system. If electricity usage can be adjusted to different load situations, it enables an economical way to increase power systems flexibility. Controlling loads in this purpose can be called demand response. This thesis studies the feasibility of building ventilation and lighting systems for demand response. The central research questions were the following: are those electric loads suitable for fast demand response, and what kind of technical solutions can be used for demand response in commercial, office and educational buildings.

The suitability of electrical loads to demand response was studied using practical field tests in an existing school building. The power of ventilation and lighting was decreased shortly to see the impacts on the current electric power and the conditions of air quality and lighting levels. Air quality was monitored by measuring the carbon dioxide level and lighting conditions were monitored by measuring the light levels and user survey.

The results of the study indicate that both systems are suitable for demand response. The amount of air was successfully decreased by 60 % in the test without any remarkable harm to air quality. This corresponded to about 75 % drop in present electric power, and with six ventilation units it would mean 18 – 20 kW potential to demand response at daytime. That means 2,5 – 3 W/m² in relation to buildings gross area. The power drop was reached in 10 to 15 seconds. Groups of luminaires were dimmed by up to 30 % in 30 seconds, with no reported occupant complaints. Only 25 % of the test group noticed some changes in lighting. Dimmable lighting enables about 3 – 6 kW potential to demand response. That means 0,5 – 1 W/m² in relation to buildings gross area.

In conclusion, electrical loads of ventilation and lighting from building types in question can be utilized in demand response reserve market when the electrical loads are controlled by building automation systems. Current building automation systems enables electric loads control already, but changes are needed in designing practices. In order to utilize buildings' electric loads into operation of demand response, clear guidelines should be defined for system design and implementation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana ”Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR-pooli)” – hanketta. Työ tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun toimeksiannosta. Työn tarkastajana toimi professori Pertti Järventausta ja ohjaajana diplomi-insinööri Veijo Piikkilä.

Kiitokset Pertille kannustavista kommenteista ja työn täsmällisestä tarkastamisesta. Veijolle suuri kiitos keskusteluista ja aktiivisesta ohjaamisesta koko työn aikana. Kiitos lisäksi Tampereen ammattikorkeakoulun henkilökunnalle diplomityöaiheesta sekä käytännön kenttäkokeiden mahdollistamisesta. Lämpimät kiitokset myös Maijalle kannustuksesta koko opintojeni aikana.

Kööpenhaminassa, 18.3.2015

Jaakko Luoma

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Kiinteistökuormat osana sähköverkkoa	2
1.2	Aiheeseen liittyvä aiempi tutkimustyö	3
1.3	Työn tavoitteet, tutkimuskysymykset ja raja- aus	5
1.4	Käytetyt tutkimusmenetelmät	6
1.5	Työn rakenne	6
2.	KYSYNNÄN JOUSTO	7
2.1	Tarve kysynnän joustolle	7
2.2	Kysynnän jouston eri toteutusmallit.....	8
2.3	Tämän hetken markkinapaikat kysynnän joustolle	9
3.	KYSYNNÄN JOUSTON POTENTIAALI LIIKE-, TOIMISTO- JA OPETUSRAKENNUKSISSA	11
4.	KIINTEISTÖAUTOMAATIO KYSYNNÄN JOUSTOSSA.....	15
4.1	Kiinteistöautomaatiojärjestelmät.....	15
4.1.1	Kiinteistöautomaatiojärjestelmien rakenne	16
4.1.2	Keskitetyt kiinteistöautomaatiojärjestelmät.....	18
4.1.3	Hajautetut ja integroidut kiinteistöautomaatiojärjestelmät	19
4.2	Toiminnalliset ja ei-toiminnalliset vaatimukset kysynnän jouston näkökulmasta	20
4.2.1	Kysynnän jouston ohjauksissa huomioitava lainsäädäntö, määräykset ja standardit	21
4.2.2	Taloteknisten järjestelmien ohjaustoimintojen priorisointi.....	26
4.2.3	Kuormien todentaminen.....	29
4.2.4	Tiedonsiirtoon liittyvä tietoturva	29
4.3	Avoimeen tiedonsiirtoon perustuvat rajapinnat kiinteistöjen ja sähköverkon rajapinnassa.....	30
4.3.1	Kanoninen tietomalli.....	31
4.3.2	Rakennusten ja sähköverkon välisen tiedonsiirron standardi prEN 50491-12.....	33
4.3.3	CIM – tietomalliin pohjautuva kiinteistöjen rajapinta, IEC 61968-9 CIM	34
4.3.4	OpenADR -järjestön kehittämä rajapinta kysynnän joustoon.....	38
4.3.5	EEBus.....	38
5.	CASE-KOHTEEN KENTTÄKOKEIDEN TULOKSET	40
5.1	Tutkimusasetelman kuvaus	40
5.2	Ilmanvaihtojärjestelmän kenttäkokeiden tulokset.....	43
5.2.1	Vaikutukset olosuhteisiin.....	44
5.2.2	Potentiaalinen tehokuorma kysynnän joustoon.....	48

5.2.3	Ilmanvaihtokoneen säädön toteuttaminen kysynnän jouston kannalta	49
5.3	Yleisvalaistusjärjestelmän kenttäkokeiden tulokset.....	51
5.3.1	Vaikutukset olosuhteisiin.....	52
5.3.2	Potentiaali kysynnän joustoon	54
5.4	Tarkasteltujen sähkökuormien tehoprofiili normaalin käyttöjakson aikana	55
6.	CASE-KOHTEEN TULOSTEN TARKASTELU	57
6.1	Kiinteistöautomaatio ja talotekniset järjestelmät	57
6.1.1	Taloteknisten järjestelmien ajallinen käyttäytyminen.....	58
6.1.2	Kuormien todentaminen.....	60
6.2	Ilmanvaihdon ohjattavuus kysynnän joustossa	61
6.3	Yleisvalaistuksen ohjattavuus kysynnän joustossa	63
7.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	65
7.1	Kiinteistökuormien potentiaali	66
7.2	Suositukset kysynnän jouston huomioimiseksi suunnitteluvaiheessa.....	66
7.3	Ilmanvaihdon ja yleisvalaistuksen soveltuvuus kysynnän joustoon	68
7.4	Jatkotutkimuskohteet.....	69
	LÄHTEET	71

LIITE A: HIILIDIOKSIDIPITOISUUDET, 15 MINUUTIN PYSÄYTYS

LIITE B: HIILIDIOKSIDIPITOISUUDET, 15 MINUUTIN PUDOTUS OSAILMA-MÄÄRÄLLE

LIITE C: VALAISTUSKOKEEN KYSYMYSLOMAKE

LIITE D: INTEGROIDUN JA HAJAUTETUN KIINTEISTÖAUTOMAATIOJÄR-JESTELMÄN JÄRJESTELMÄKAAVIO

LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMIEN MÄÄRITELMÄT

ADR	Automated Demand Response
AMR	Automatic Meter Reading
BACnet	Standardoitu kommunikointiprotokolla
BACS	Building Automation and Control System
BAU	Business As Usually
CEM	Customer Energy Management
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CIM	Common Information Model
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DR	Demand Response
EEBus	Avoin tiedonsiirtoprotokolla älyverkoille
GSM	Global System for Mobile Communications
HBES	Home and Building Electronic Systems
HEMS	Home Energy Management System
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
ICT	Information and Communications Technology
IEC	International Electrotechnical Commission
INCA	Interactive Customer Gateway
IP	Ingress Protection
IV	Ilmanvaihto
KNX	Kansainvälinen kiinteistöautomaatiostandardi
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LON	Local Operating Network
LUT	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LVI	Lämpö, Vesi ja Ilmastointi
Modbus	Sarjaliikenneprotokolla
OpedADR	Open Automated Demand Response
RK	Ryhmäkeskus
SAGA	Smart Control Architecture for Smart Grids
SFP-luku	Specific Fan Power, ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SGEM	Smart Grids and Energy Markets
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TK	Tuloilmakone
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VAK	Valvonta-alakeskus
XML	Extensible Mark-up Language
XSD	XML Schema Definition
ZigBee	IEEE 802.15.4-standardin mukainen lyhyen kantaman tietoliikenneverkko
CO ₂ e	Hiilidioksidiekvivalentti

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos näkyy muun muassa muuttuvina sääolosuhteina ja kasvavina kasvihuonekaasupäästöinä. Ihmisen kontribuutiosta ilmastonmuutokseen ei enää juurikaan väitellä, vaan vaikutuksemme on tunnustettu (IPPC, 2013). Vuonna 2011 maailmanlaajuiset päästöt olivat 49 GtCO₂e, ja päästöjen ennustetaan kasvavan 55 GtCO₂e ja 80 GtCO₂e vuosiin 2020 ja 2050 mennessä (GeSI, 2012).

Niin kutsuttua vähähiilistä yhteiskuntaa tutkitaan ja edistetään useilla tahoilla, joista tieto- ja kommunikaatioteknologioiden (ICT) käyttö on yksi lupaavimmista. On todettu, että ICT:n avulla voidaan vähentää jopa 9,1 GtCO₂e vuoden 2020 päästöistä, mikä tarkoittaa 16,5 % päästövähennystä business as usual (BAU) skenaarioon verrattuna (GeSI, 2012). Päästövähennys on yli seitsemän kertaa ICT:n omaa hiilijalanjälkeä suurempi (GeSI, 2012). Tämän päästövähennysarvion tuottavan \$1,9 biljoonan säästöt kuluttajille ja yrityksille ja luovan 29,5 miljoonaa työpaikkaa (GeSI, 2012).

Huomattava osa ICT:n potentiaalista tulee energia- ja rakennusaloilta. Energiasektorin muuttuessa dynamisemmaksi esimerkiksi älykkäiden sähköverkkojen ja uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämisen kautta arvioidaan tuottavan 2 GtCO₂e päästösäästöt, mikä tarkoittaa 22 % osuutta koko vähenemästä (GeSI, 2012). Rakennussektorin taas täytyy pystyä hyödyntämään paikallista uusiutuvaa energiaa ja käyttämään muun muassa valaistusta, lämmitystä, ilmanvaihtoa ja jäähdytystä tehokkaammin kuin aikaisemmin. Näiden parannusten arvioidaan tuottavan 1,6 GtCO₂e (18 % vähenemästä) päästösäästöt. (GeSI, 2012)

Sähkönkäytön kasvaminen ja tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi lisäävät väistämättä uusiutuvan energiantuotannon osuutta. Tämä tuo uudenlaisia haasteita perinteisen sähkövoimajärjestelmän ja sähköverkkojen hallintaan. Uusiutuvan hajautetun energiantuotannon lisääntyminen aiheuttaa haasteita sähköverkoille, joiden suunnittelu on alun perin toteutettu keskitettyjen voimalaitosten näkökulmasta. Uusiutuvan energiantuotannon myötä tuotannon vaihtelut kasvavat ja samalla säädettävän tuotannon väheneminen lisää tarvetta löytää sähköverkon joustavuutta muualtakin kuin tuotannosta (Hallila, 2009). Tulevaisuuden sähkövoimajärjestelmien tulee pystyä reagoimaan esimerkiksi ajoittaiseen tai sääriippuaiseen tuotantoon, kuten aurinko- ja tuulienergiaan. Vastatakseen näihin haasteisiin, sähkövoimajärjestelmän tulee kehittyä ja muuntautua niin, että kaikki verkon osapuolet ovat kykeneviä vaihtamaan tietoa heidän sähkökuormiensa tilasta ja tuotantokapasiteetista reaaliaikaisesti. Tällaista kokonaisuutta voidaan kutsua älykkääksi sähköverkoksi.

Myös sähkönkulutuksen luonne on muuttumassa yhä enemmän epätasaisemmaksi ja päivittäiset vaihtelut ja kulutuspiikit voivat olla hyvinkin suuria (TTY, LUT, VTT, 2010). Tehopiikkien sähköntarpeen tuottaminen ainoastaan sähköntuotannon keinoin ei ole taloudellisesti järkevää. Kulutuksen mukautuminen sähkövoimajärjestelmän eri kuormitusilanteisiin mahdollistaisi taloudellisen vaihtoehdon sähköjärjestelmän joustavuuden kasvattamiseen. Sähkökuormien ohjaamista tässä tarkoituksessa kutsutaan kysynnän joustoksi. Kysynnän jousto on osa älykkäiden sähköverkkojen kokonaisuutta, jolla voidaan lisätä sähköverkon luotettavuutta ja taloudellisuutta. Mikäli ohjattavia kuormia olisi riittävästi tarjolla ja niitä voitaisiin ohjata keskitetysti, voisi tämä muun muassa vähentää käyttöasteeltaan vähäisten reservivoimalaitoksien tarvetta. Suomen kantaverkkoyhtiön Fingrid Oyj:n kanta tulevaisuuden reservihallinnasta onkin, että kulutuskuormien sopimus pohjainen irtikytkeminen verkon häiriötilanteessa olisi järkevämpää reservipolitiikka kuin suurien varavoimalaitosten rakentaminen (Hallila, 2009).

Älykkäiden sähköverkkojen ja kysynnän jouston ratkaisut vaativat useiden eri toimijoiden hyvää yhteistyötä sekä eri järjestelmien yhteensopivuutta. Isona haasteena onkin toimivan kokonaisuuden toteuttaminen. Kysynnän jouston kehittämiseksi tarvitaan muun muassa toimialojen, palveluntarjoajien ja tutkijoiden yhteistyötä, jotta voidaan esimerkiksi luoda sopivia standardeja ja toimintamalleja palveluntarjoajille sekä laite- ja järjestelmätoimittajille.

1.1 Kiinteistökuormat osana sähköverkkoa

Älykkäät kiinteistöt, joiden sähkökuormia voidaan hyödyntää osana koko sähkövoimajärjestelmää, ovat tulevaisuudessa osa älykästä sähköverkkokokonaisuutta. Palvelurakennuksien osuus esimerkiksi Helsingissä edustaa jo yli puolet kokonaissähköenergian kulutuksesta. Tällöin myös sektorilla tapahtuva kulutus ja kuormitus vaikuttavat oleellisesti koko alueen sähköverkon toimintaan (Larinkari, 2012). Sähkön ja automaation merkitys energiatehokkaissa kiinteistöissä korostuu tulevaisuudessa entisestään.

Kysyntäjouston laajamittaisempi käyttöönotto voisi olla luontevinta toteuttaa ensin palvelu-, liike- ja toimistorakennuksista. Tämän tyyppisissä kohteissa löytyy jo laajalti kysynnän jouston mahdollistavia taloteknisiä ratkaisuja ja mahdollisesti myös selkeämpi taloudellinen potentiaali. Yksityisasiakkaille kysynnän jousto tarjoaa vielä toistaiseksi verrattain vähäistä kustannussäästöä. (DR-pooli, 2015) Tämä perustuu siihen, että kuluttajalähtöinen kysynnän jousto, kuten esimerkiksi markkinahintaan perustuva kulutuksen ohjaaminen, ei vielä verrattain pienistä sähkönhinnan vaihteluista ja suhteellisen pienestä kuormapotentiaalista johtuen toistaiseksi tuota merkittävää säästöä.

Liike-, toimisto- ja koulurakennusten osalta kysynnän joustomarkkinat voisivat kuitenkin tarjota jo huomattavaa taloudellista hyötyä, varsinkin jos esimerkiksi saman kiinteistön omistajan omistuksessa on useita kohteita. Tällaisia kiinteistöjen omistajia voisivat olla esimerkiksi kunnat ja kaupungit, kaupat tai muut keskitetyt kiinteistöjen omistajat.

Sähkökuormien tarjoaminen reservimarkkinoille omaa tällä hetkellä jo merkittävän taloudellisen potentiaalin. (DR-pooli, 2015) Vaatimukset reservimarkkinoille tarjottavien sähkökuormien ohjattavuudesta ja kapasiteetista on kuitenkin määritelty tarkasti. Tämä asettaa kiinteistöjen sähkökuormien ohjattavuudelle ja mittaamiselle uudenlaisia vaatimuksia.

Älykkäät sähkömittarit (AMR) ovat vain yksi tapa toteuttaa kysynnän joustoa. Keskitetty ja reaaliaikainen kysynnän jousto vaatii käytännössä kaksisuuntaisen tiedonsiirron. Kommunikointi kiinteistöjen järjestelmien ja ulkopuolisten järjestelmien välillä ei onnistu tämän hetken älykkäiden sähkömittareiden välityksellä. Laajamittaisempi ja toiminnoiltaan monipuolisempi kysynnän jousto edellyttää täten kiinteistöjen rajapintaan standardoidun ja avoimen kommunikointirajapinnan, joka mahdollistaa järjestelmien ja laitteiden yhteensopivuuden. Laajamittaisemmat kysynnän jousto hankkeet esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Euroopassa on toteutettu avoimiin tiedonsiirtoprotokolliin perustuen.

Suuremmissa kiinteistöissä taloteknisten järjestelmien ja tätä kautta sähkökuormien ohjaaminen tapahtuu jo hyvin pitkälle kiinteistöautomaatiojärjestelmien ohjaamana. Tämän tyyppisissä kiinteistöissä kiinteistökuormat ovat täten verrattain helposti otettavissa käyttöön kysynnän joustoon. Tämä vaatii kuitenkin järjestelmien integraatiota yli tavanomaisten rajojen esimerkiksi sähkönmyyjän järjestelmiin.

1.2 Aiheeseen liittyvä aiempi tutkimustyö

Tämä työ on tehty osana ”Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR-pooli)” -hanketta. Hankkeen keskeisimpinä tavoitteina on ollut selvittää Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut kuormien ohjaamiseksi niin uusissa tyyppikohteissa kuin olemassa olevissa rakennuksissa sekä analysoida kysynnän jouston vaikutuksia verkkoyhtiöille. Hanke on toteutettu projektiosapuolien yhteistyönä. Tutkimuksesta ovat vastanneet Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähkötekniikan ja Rakennustekniikan laitosten, Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) Rakentaminen ja teknologia-yksikön sekä Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) Sähkömarkkinalaboratorion tutkijoiden ja asiantuntijoiden muodostama ryhmä. Hanke on jakautunut viiteen osatehtävään: (DR-pooli, 2015)

1. Kysynnän jouston tarpeet, hinnoittelurakenteet ja markkinamekanismit
2. Kysynnän jouston teknis-taloudellinen potentiaali
3. Kuluttajapään tekniset ratkaisut erilaisissa kohteissa
4. Kysyntäjouston vaikutukset jakeluverkkoyhtiöille
5. Lainsäädäntö ja viranomaisvalvonta

Hankkeen puitteissa järjestetyt yrityspajat laajalle yrityssectorille ovat merkittävässä osassa tiedon ja tutkimuksen tulosten jakamisessa laajempaan tietoisuuteen (DR-pooli, 2015). Hankkeen ohella muun muassa Tampereen ammattikorkeakoulussa on valmistu-

nut neljä kuluttajapään teknisiin ratkaisuihin keskittyvää opinnäytetyötä. Hanke päättyy alkuvuodesta 2015.

DR-pooli – hanketta voidaan pitää jatkona Cleen Oy:n SGEM (Smart Grids and Energy Markets) -tutkimusohjelmalle, jossa on tutkittu laaja-alaisesti sähköenergia-alan tulevaisuutta (DR-pooli, 2015). Tutkimusohjelmassa on selvitetty muun muassa kysynnän jouston mahdollisuuksia sähkömarkkinoiden näkökulmasta. Hankkeen tulokset ovat kehittäneet Suomea toimintaympäristönä uusille korkean teknologian investoinneille luomalla vahvan innovaatiokeskittymän älykkäisiin sähköverkkoihin liittyen. Hankkeen yhteydessä toteutetut konkreettiset älyverkkokokeilut ovat mahdollistaneet uudenlaisen yhteistyön tutkimuksen ja toimialojen välillä. SGEM ohjelman loppuraportti on julkaistu 20.11.2014. (CLEEN Oy, 2014)

Vuosina 2008–2010 INCA (Interaktiivinen asiakasliityntä ja sen hyödyntäminen sähköjärjestelmän hallinnassa ja energiatehokkuuteen kannustavissa palveluissa) projektissa on selvitetty muun muassa asiakkaan kuorman ohjauksen teknologisia ratkaisuja ja markkinapohjaisen ohjauksen liiketoimintamalleja. Hankkeen tuloksena on muun muassa määritelty ja demonstroitu interaktiivisen asiakasliityntän tekninen konsepti. Projektin toteutuksesta ovat vastanneet TTY, LUT ja VTT. (TTY, LUT, VTT, 2010)

Kysynnän joustoa on tutkittu myös Aalto yliopiston SAGA (Smart Control Architecture for Smart Grids) – hankkeessa. Hankkeessa on selvitetty muun muassa sähkölämmitysten mahdollisuuksia ja lämmityskuormien mallintamista kysynnän jouston näkökulmasta. Hanke päättyy vuonna 2016. (Aalto-yliopisto, 2014)

Käytännön asteelle päässeitä kysynnän joustoon liittyviä hankkeita on toteutettu Suomessa jo muutamia. Markkinahintaperusteista kysynnän joustoa sähkölämmityskohteissa on testattu niin asuinkiinteistöiden kuin kerrostaloakohteidenkin osalta ainakin Helsingin Energian ja Oulun Energian hankkeissa. Hankkeiden yhteydessä on muun muassa todettu että asiakkaat ovat kiinnostuneista jo tällä hetkellä tämän tyyppisistä palveluista. (Oulun Energia, 2014; Uusitalo, 2014)

Fingrid Oyj on selvittänyt voimakkaasti viime vuosina eri sähkökuormien soveltuvuutta reservimarkkinoille. Pienten varavoimakoneiden hyödyntämistä taajuusohjattuna häiriöreservinä sekä säätösähkömarkkinoilla on selvitetty yhteistyössä Energiakolmio Oy:n kanssa. Pakastevaraston hyödyntämistä taajuusohjatuksi käyttöreserviksi on taasen pilotoitu yhteistyössä SEAM Groupin kanssa. (Fingrid Oyj, 2015) Lisäksi on käytynä keskusteluja liittämään useampien kauppakeskusten kiinteistökuormia kysynnän jouston reservimarkkinoille alkuvuodesta 2015.

Sähkön myyjän ja kuluttajan välistä kysynnän joustokokonaisuutta ollaan ottamassa käyttöön Kalasatamassa kahden kerrostaloakohteen osalta (ABB, 2014). Kohteiden huoneistokohtainen taloautomaatio on liitetty avointa tiedonsiirtomallia hyödyntämällä sähkömyyjän järjestelmiin. Kalasatamassa toteutettu älykkään verkon infrastruktuuri

mahdollistaa muun muassa mittausten keruun laiteryhmäkohtaisesti sekä sähkökuormien etäohjaamisen joko keskitetysti tai kuluttajan ohjaamana (ABB, 2014).

Suurempien kiinteistöjen sähkökuormien ja -järjestelmien soveltuvuutta keskitettyyn kysynnän joustoon on kuitenkin tutkittu Suomessa hyvin vähän. Useimmat tutkimukset ovat keskittyneet joko markkinahintaperusteiseen kysynnän joustoon, pienkiinteistöjen sähkölämmityskuormiin tai älykkäiden sähkömittareiden hyödyntämiseen kysynnän joustossa.

1.3 Työn tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaus

Työn tavoitteena oli tutkia liike-, toimisto- ja koulurakennuksien kuormanohjauspotentiaalia ja mahdollisuuksia sähkövoimajärjestelmän häiriöreservin näkökulmasta. Oleellista ohjattavien kuormien suhteen on häiriöreservitilanteessa ennen kaikkea kuorman nopea ohjattavuus. Yksi keskeinen haaste kysynnän jouston yleistymiseen kiinteistökuormienkin osalle on eri järjestelmien ja palveluntarjoajien tiedonsiirron ja kommunikoinnin integraatiossa. Tässä työssä oli tarkoitus lisäksi selvittää millaisia vaihtoehtoja on tällä hetkellä olemassa kiinteistöjen rajapinnassa kysynnän jouston tarpeisiin.

Keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat:

- Mitä potentiaalisia ohjattavia kuormia on liike-, toimisto- ja koulurakennuksissa kysynnän jouston kannalta?
- Millaisia ohjaustapoja ja -järjestelmiä voitaisiin hyödyntää kysynnänjouston toteutuksessa näissä kiinteistöissä?
- Soveltuvatko kiinteistökuormat kysynnän joustoon reservimarkkinoiden näkökulmasta?

Kysynnän jousto kokonaisuutena on hyvin moni-ilmeinen ja -tahoinen kokonaisuus, joten työn onnistumisen kannalta oli tärkeää suunnitella työn rajaaminen huolella. Tässä työssä keskitytään suurempien kiinteistöjen sähkökuormien tarkasteluun. Tutkittaviksi rakennustyypeiksi valittiin liike-, toimisto- ja koulurakennukset, joiden talotekniset järjestelmät ovat melko hyvin rinnastettavissa keskenään.

Oleellisena osana kuormien ohjauksessa ovat kiinteistöautomaatiojärjestelmät. Valtaosassa tarkasteluun valitusta rakennuskannasta on jo lähtökohtaisesti monipuoliset kiinteistöautomaatiojärjestelmät. Näiden kiinteistöjen osalta kysynnän jouston ohjaukset voidaan nähdä toteutettavaksi kiinteistöautomaatiojärjestelmien ohjaamana (DR-pooli, 2015).

Järjestelmien osalta tutkimus on rajattu koskemaan valaistus- ja ilmanvaihtojärjestelmiä. Tämä johtuu siitä, että tutkimuskohteessa on tarvittavat modernit järjestelmät kyseisille toiminnoille. Lisäksi ilmanvaihtoa ja valaistusta on mahdollista säätää ja ohjata nykyisten säädösten ja määräysten puitteissa. Hypoteesina on, että pienellä muutoksella saa-

daan aikaan tarvittava sähkötehon muutos ilman, että käyttäjien olosuhteet huononevat merkittävästi.

1.4 Käytetyt tutkimusmenetelmät

Työn soveltava osuus toteutettiin käytännön kuormanohjauskokeena käytössä olevassa koulurakennuksessa. Tutkimusmenetelmänä on siis case study, eli tapaustutkimus.

Tapaustutkimus auttaa vastaamaan ”miten” ja ”miksi” tyyppisiin kysymyksiin ja tutkii ajankohtaista käytännön tilannetta. Lisäksi tapaustutkimuksessa tutkija ei pysty kontrolloimaan tapahtumia. Tässä tapauksessa käytössä on rakennuksessa jo olevat järjestelmät, eikä saatuun ja mitattuun potentiaaliin voitu vaikuttaa. (Yin, 2003)

Koejärjestelyt suoritettiin vuonna 2013 peruskorjatussa koulurakennuksessa ja tutkittavina järjestelminä olivat kohteen ilmanvaihto ja yleisvalaistus. Ilmanvaihdon käynnin pudottaminen pystyttiin toteuttamaan olemassa olevan automaatiojärjestelmän avulla. Lisäksi yhden ilmanvaihtokoneen toimintaohjelmaa muutettiin siten, että pudotustoiminto saatiin toteutettua nopeammin. Valaistuksen ohjausjärjestelmän toimintaa muutettiin yhden kerroksen osalta niin, että ulkoisella komennolla voitiin ohjata haluttu määrä valaistustehoa pienemmäksi. Ohjaustoimenpiteiden olosuhdevaikutuksia seurattiin olosuhdemittauksin sekä koeryhmälle pidetyn kyselyn avulla.

Koejärjestelyitä tehtäessä arvioitiin millaisia muutostarpeita järjestelmiin tuli toteuttaa, jotta kiinteistön sähkökuormia voitaisiin hyödyntää kysynnän joustossa. Samalla pystyttiin selvittämään kuinka kysynnän jouston tarpeet tulisi ottaa huomioon uusien kohteiden taloteknisissä järjestelmissä.

1.5 Työn rakenne

Tämän työn luvuissa 2 – 4 käsitellään työn taustaa. Luvussa 2 kerrotaan sähkökysynnän jouston eri toteutusmalleista ja tämän hetken markkinapaikoista. Luvussa 3 arvioidaan nykyiseen rakennuskantaan pohjautuen sähkökuormien potentiaalia liike-, toimisto- ja koulurakennuksissa. Luvussa 4 käsitellään kiinteistöautomaatiojärjestelmiä kysynnän jouston näkökulmasta sekä luodaan katsaus mahdollisuuksista sähköverkkojen ja kiinteistöjen järjestelmien väliselle rajapinnalle.

Luvussa 5 esitetään kuormanohjauskokeiden tulokset. Lopuksi luvuissa 6 ja 7 tarkastellaan tuloksia ja tuodaan esille työn johtopäätökset ja yhteenveto.

2. KYSYNNÄN JOUSTO

Kysynnän jousto on moni-ilmeinen ja -tahoinen kokonaisuus, jossa useiden eri toimijoiden ja järjestelmäkokonaisuuksien tulisi toimia saumattomasti keskenään (DR-pooli, 2015). Perusajatukseltaan kysynnän jousto on hyvin yksinkertainen, sähkökuormia ohjataan tarvittaessa sähköjärjestelmän eri tuotanto-, kuormitus- ja häiriötilanteiden perusteella. Kysynnän joustoa onkin harjoitettu onnistuneesti jo vuosia esimerkiksi 2-aikatariffin muodossa sähkömittareiden ohjaamana. Sähköenergiajärjestelmän tarpeet kysynnän joustolle ovat kuitenkin muuttuneet vuosien aikana.

Laajempi ja monipuolisempi kysynnän jousto vaatii muun muassa järjestelmien ja tiedonsiirron parempaa reaaliaikaisuutta, tiedonsiirron ja eri järjestelmien integraatiota yli perinteisten rajojen sekä kiinteistöjen puolella uudenlaisia toimintamalleja automaation ja sähköjärjestelmien toteuttamiseen. Kysynnän joustoa terminä käytetään hyvinkin erilailla eri yhteyksissä. Tulee ymmärtää, että erilaiset kysynnän jouston toteutukset edellyttävät hyvinkin erilaisia teknisiä ratkaisuja sekä palvelutuotteita. Kysynnän joustoa ei tule ymmärtää sähkökuormien näkökulmasta energiansäästöratkaisuna, mutta kysynnän joustolla voidaan lisätä esimerkiksi koko sähkövoimajärjestelmän kokonaistehokkuutta.

Seuraavissa kappaleissa kerrotaan minkä vuoksi kysynnän jousto tulee jatkossa olemaan yhä tärkeämpää luotettavan ja taloudellisen sähköjärjestelmän kokonaisuudessa. Lisäksi kuvataan erilaisia kysynnän jouston toteutusmahdollisuuksia sekä tarjolla olevia markkinoita, joilla kysynnän joustoa on mahdollista harjoittaa.

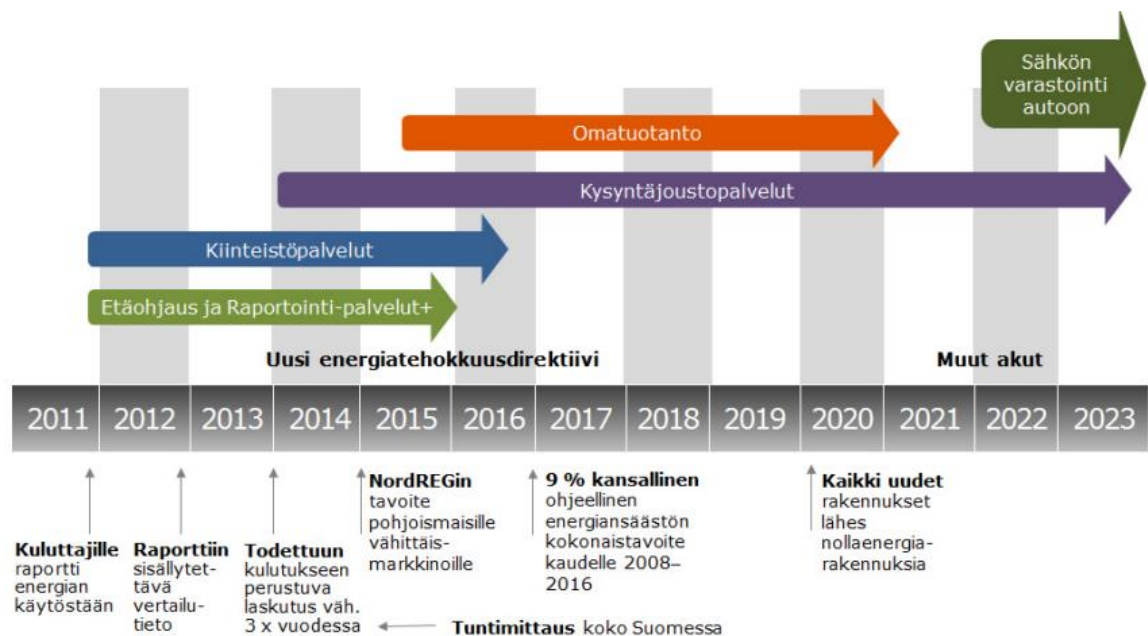
2.1 Tarve kysynnän joustolle

Tarvetta erityyppisille kysynnän jouston malleille on Suomessa jo tällä hetkellä. Viime vuosina sähkömarkkinoilla on havaittu useita jo varsin korkeita hintapiikkejä ja tulevana vuosina näiden voidaan ennustaa lisääntyvän (TTY, LUT, VTT, 2010). Hintapiikit ja sähkömarkkinahinnan korkeat vaihtelut lisäävät kuluttajalähtöisen kysynnän jouston kannattavuutta tulevaisuudessa. Vielä tällä hetkellä markkinahintaperusteinen kuormien ohjaus tuottaa kuitenkin pienasiakkaille verrattain vähäistä taloudellista hyötyä (DR-pooli, 2015).

Suurimman voimalaitosyksikkökoon kasvaminen Olkiluodon kolmannen yksikön valmistuessa lisää merkittävästi nopean häiriöreservin tarvetta. Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n on varauduttava lisäämään häiriöreserviä nykyisestä 865 megawattista 1 300 megawattiin, kun uusi yksikkö liitetään verkkoon. Lisäksi tuulivoimalla tuotetun sähkön

määrän ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa merkittävästi Suomessa. Sääriippuvainen tuotanto lisää vastaavasti tarvetta säätösähkölle. (Hallila, 2009) Reservi- ja säätösähkömarkkinat tarjoavat jo tällä hetkellä merkittävää taloudellista potentiaalia (DR-pooli, 2015).

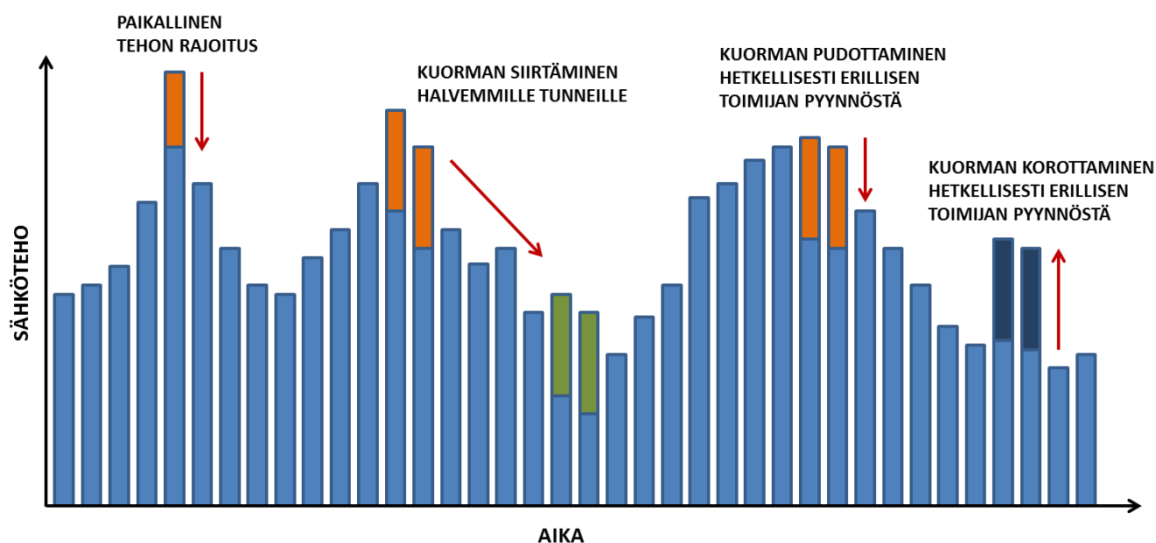
Kuluttajatutkimuskeskuksen vuonna 2012 julkaisemassa tutkimusraportissa *Asiakkaan näkökulma älykkään sähköverkon lisäarvoon*, tavoitteena oli muun muassa tunnistaa sekä asiakkaiden että muiden ulkopuolisten tahojen tarpeita, ja näin ollen edesauttaa eri osapuolia innovoimaan uusia palveluita. Tutkimuksen yhteydessä pidetyn yrityspajan tuloksissa kysynnän jousto nähdään potentiaaliltaan yhtenä suurimmista kuluttajille lisäarvoa tuottavista osa-alueista. (Heiskanen; Matschoss; & Saastamoinen, 2012) Asian- tuntijaryhmän yhteistyönä muodostunut tulevaisuusnäkymä älyverkkopalveluiden kehittymisestä esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Älyverkkojen kehitys (Heiskanen; Matschoss; & Saastamoinen, 2012).

2.2 Kysynnän jouston eri toteutusmallit

Kiinteistökuormat voidaan käsittää hajautettuna resurssina siinä missä hajautettu tuotanto tai energiavarastot (TTY, LUT, VTT, 2010). Tätä hajautettua resurssia on mahdollista hyödyntää niin sähköjärjestelmän tarpeisiin kuin kuluttajienkin hyödyksi. Kiinteistökuormien hyödyntäminen kysynnän joustossa edellyttää kuitenkin niin tekniikan kuin liiketoimintamallien kehittämistä (TTY, LUT, VTT, 2010). Kuvassa 2 on kuvattu erilaisia kysynnän jouston toteutusmalleja kuormien ohjaamiseen.



Kuva 2. Kysynnän jouston eri toteutusmahdollisuuksia.

Kysynnän joustoa voidaan harjoittaa useasta eri näkökulmasta ja tarpeesta. Käsitteen yksinkertaistamiseksi voidaan kysynnän jousto jakaa kuluttajalähtöiseen ja keskitettyyn kysynnän joustoon. Kysynnän joustoa voidaan harjoittaa keskitetysti esimerkiksi kysynnän jouston palveluita tarjoavan aggregaattorin kautta tai itsenäisesti kuluttajan päässä (TTY, LUT, VTT, 2010). Kuluttajalähtöisellä kysynnän joustolla voidaan käsitellä muun muassa paikallisesti sähkön markkinahintaan tai huipputehon rajoittamiseen perustuvaa kuorman ohjausta. Keskitettyä kysynnän joustolla voidaan taas käsitellä esimerkiksi kantaverkkoyhtiön ylläpitämät reservikuormat. Keskitetty kysynnän jousto voi tapahtua esimerkiksi sähkövoimajärjestelmän tarpeesta vähentää tai lisätä verkon kuormaa. Tällöin on helpompi ymmärtää, että eri kysynnän joustomallit edellyttävät myös erilaisia teknisiä ratkaisuita.

2.3 Tämän hetken markkinapaikat kysynnän joustolle

Kantaverkkoyhtiöllä on pohjoismaisessa sähkövoimajärjestelmässä velvollisuus ylläpitää tietty määrä erityyppistä reserviä. Vaatimukset kuorman suuruudelle ja ohjattavuuden vasteelle pohjautuvat täten kansalliselle vaatimukselle omata tietyn tyyppistä reserviä tietty määrä. (Fingrid Oyj, 2015) Kysynnän joustolle on jo tällä hetkellä tarjolla useita markkinapaikkoja. Eri markkinapaikat ja niiden vaatimukset sähkökuormilta tai tuotannolta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kysynnän jouston markkinapaikat ja vaatimukset (Fingrid Oyj, 2015).

Markkinapaikka	Sopimustyyppi	Minimi-säätö	Vaatus aktivoi-tumisajalle	Aktivoituu	Korvaustaso *) 2014
Taajuusohjattu käyttöreservi	Vuosi- ja tunti-markkinat	0,1 MW	3 min	Jatkuvasti	15,8 €/MW,h (vuosi-markkinat) + energia-hinta
Taajuusohjattu häiriöreservi	Vuosi- ja tunti-markkinat	1 MW	5 s / 50% ja 30 s / 100%, kun f alle 49,9 Hz TAI 30 s, kun f alle 49,7 Hz ja 5 s, kun f alle 49,5 Hz	Useita kertoja vuorokaudessa	4,03 €/MW,h (vuosi-markkinat)
Taajuusohjattu häiriöreservi (on-off-malli)	Pitkäaikainen sopimus	10 MW	Välittömästi, kun f alle 49,5 Hz	N. kerran vuo- dessa	~0,5 €/MW,h + 580 €/MWh + akti- vointi-korvaus 580 €/MW
FRR-A	Tuntimarkkinat	5 MW	Alettava 30 s kuluessa signaa- lin saapumisesta, oltava täysmää- räisesti aktivoitu- nut 2 minuutissa	Useita kertoja vuorokaudessa	tuntimarkkinat + ener- giahinta
Säätösähkö- markkinat	Tuntimarkkinat	10 MW	15 min	Tarjousten mu- kaan, useita kertoja vuoro- kaudessa	Markkina-hinta
Nopea häiriöreservi	Pitkäaikainen sopimus	10 MW	15 min	N. kerran vuo- dessa	~0,5 €/MWh + 580 €/MWh
Elspot (**)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	12 h	-	Markkina-hinta
Elbas (**)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	1 h	-	Markkina-hinta
Tehoreservi (***)	Pitkäaikainen sopimus	10 MW	15 min	Harvoin	-

Taulukosta voidaan huomata, että toisin kuin markkinahintalähtöisessä kysynnän jous-
tossa, reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää vasteajoiltaan ja kapasiteetiltaan
huomattavasti tiukempia vaatimuksia. DR-pooli hankkeen yhteydessä on selvitetty eri
markkinapaikkojen potentiaalia tarkemmin.

3. KYSYNNÄN JOUSTON POTENTIAALI LIIKE-, TOIMISTO- JA OPETUSRAKENNUKSISSA

Suomen olemassa olevasta rakennuskannasta vuoteen 2012 mennessä lukumäärällisesti noin 5 % on liike-, toimisto- tai opetusrakennuksia. Kerrosalaan suhteutettuna tämä tarkoittaa noin 15 % koko rakennuskannan kerrosalasta. (Tilastokeskus, 2013) Valtaosa tämän tyyppisistä kiinteistöistä on joko kuntien ja kaupunkien tai jonkin muun keskitetyn tahon omistamia. Tämän tyyppiset kiinteistöt omaavat yleensä jo lähtökohtaisesti kiinteistöautomaatiojärjestelmän. palvelurakennusten osuuden kiinteistöjen kokonaisenergian kulutuksesta ennustetaan olevan vuonna 2020 noin neljännes (DR-pooli, 2015).

Kysynnän jouston potentiaalia arvioitaessa on oleellista tuntea laitteiden ja järjestelmien ottaman tehon käyttäytyminen. Tuntitason tehomittausta eri kuormitusryhmien osalta on hyvin vähän saatavilla, jolloin eri järjestelmien kysynnän jouston potentiaalin luotettava arviointi on haastavaa. Sähköenergian kulutuksia on seurattu, mutta tehokäyttäytymisestä tiedetään vain vähän. Todellisen kysynnän joustopotentiaalin määrittelyä tulisi tietää tehon käyttäytymisprofiili, eli kuinka esimerkiksi käyttöajat, ulkolämpötila tai viikonpäivät vaikuttavat käytettyyn sähkötehoon.

Kiinteistökuormien osalta kysynnän jouston haasteena on saada ensinnäkin selville kuinka suuria kuormia kiinteistöissä ylipäättään on ja kuinka suuria tehokokonaisuuksia kiinteistökuormilla voidaan saavuttaa. Oleellista on osata lisäksi arvioida kuormien tehokäyttäytymistä suhteessa kysynnän jouston ohjaustarpeeseen. (DR-pooli, 2015)

Toimitilojen ja liikerakennusten toteutusratkaisut eri kiinteistöjen välillä eroavat rakennusajankohdan ja käyttötarkoituksen mukaan. Tällöin todellisen kuorman ohjauspotentiaalin arvioiminen on haastavaa. Suuruusluokkaa eri kuormatyyppien sähkötehoista on kuitenkin pyritty arvioimaan mitoitusperusteisesti tilastokeskuksen rakennuskannasta tehtyjen tilastojen perusteella. Näin saadaan karkea suuruusluokka-arvio eri kuormatyyppien sähkötehoista. Ohjauspotentiaalin arviointi perustuu seuraaviin lähtöarvoihin:

Ilmanvaihto:

- olemassa olevan rakennuskannan pinta-alan perusteella
- mitoitusilmamäärät arvioitu Rakentamismääräyskokoelma D2:n perusteella (liikerakennukset $0,002 \text{ (m}^3/\text{s)/m}^2$, toimistorakennukset $0,0015 \text{ (m}^3/\text{s)/m}^2$ ja opetusrakennukset $0,003 \text{ (m}^3/\text{s)/m}^2$) (Ympäristöministeriö, 2011)

- ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehona (SFP-luku) käytetty ennen vuotta 2000 rakennetuille 3,0 (kW/m³)/s ja vuoden 2000 jälkeen 2,5 (kW/m³)/s (Ympäristöministeriö, 2011)
- tehoarvio on normaalin mitoitustilamäärän tuottamiseen tarvittava sähköteho

Jäähdytys:

- olemassa olevan rakennuskannan pinta-alan perusteella
- mitoitustehona (W/m²) on käytetty 60 W/m², josta arviolta 1/3 konetehoa
- jäähdytyksen osuutta kokonaispinta-alasta eri rakennustyypeillä arvioitu kertomilla (liikerakennukset 0,25, toimistorakennukset 0,4 ja opetusrakennukset 0,1)

Valaistus:

- olemassa olevan rakennuskannan pinta-alan perusteella
- mitoitustehona käytetty liikerakennuksille 19 W/m² ja muille rakennuksille 12 W/m²

Ränni- ja kattokaivosulatukset:

- olemassa olevan rakennuskannan pinta-alan perusteella
- arvioitu mitoitusteholla 20 W/m (lämmitysvastuksen pituus)
- tällöin arvioitu 4krs:n (a 1000 m²/krs) rakennuksen, jonka kokonaiskerrospinta-ala on 4000 m², teho on noin 4 kW (1 W/m²)

Taulukossa 2 on esitetty arviot ilmanvaihdon, jäähdytyksen, valaistuksen ja sulanapito-lämmitysten käyttämästä sähkötehosta. Rakennustyytit ovat jaoteltu Tilastokeskuksen jaottelun mukaan liike-, toimisto- ja opetusrakennuksiin.

Taulukko 2. Arvio liike-, toimisto- ja opetusrakennusten sähkötehoista.

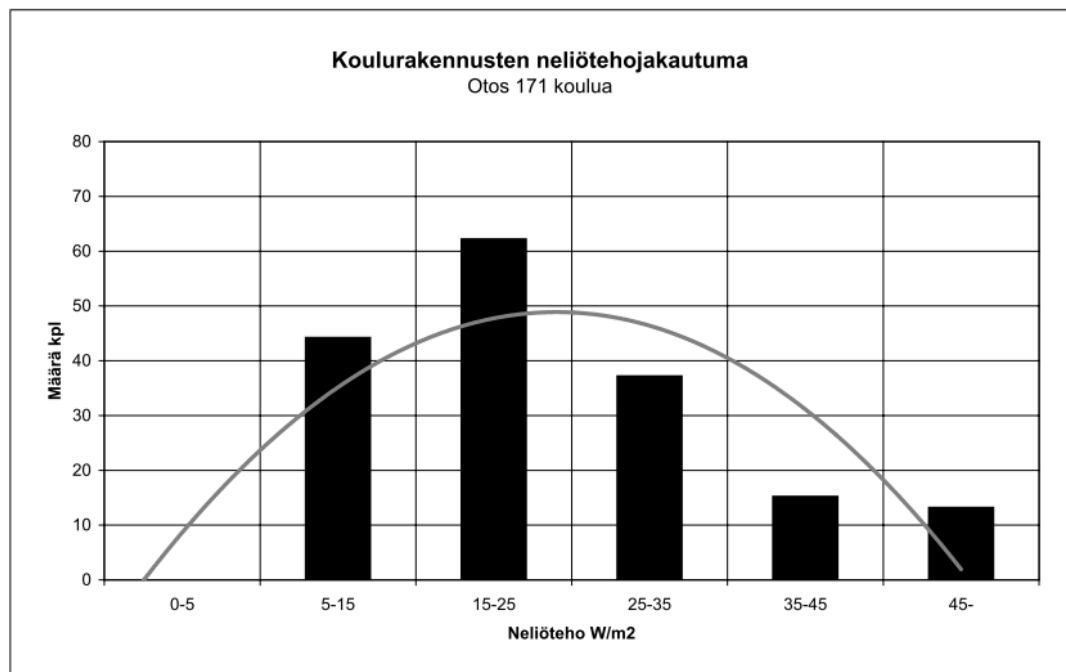
	Rakennuksia, lkm	Kerrosala, m ²	Arvio sähkötehosta / MW			
			Ilmanvaihto	Jäähdytys	Valaistus	Sulanapito (sähkö)
Liikerakennukset	42580	28320836	160	140	540	30
Toimistorakennukset	10907	19229947	90	160	240	20
Opetusrakennukset	8916	18104779	160	40	220	20
			410	340	1 000	70

Taulukossa esitetyt tehoarviot ovat käyttötilanteen mukaisia maksimitehoja, mikä tarkoittaa, että vain osa tästä tehosta olisi käytettävissä kysynnän joustoon. Järjestelmien sähkön käyttö riippuu myös voimakkaasti muun muassa tilojen käyttöajoista ja -asteista sekä esimerkiksi ulkolämpötilasta. Vanhemman rakennuskannan mitoitustehoja on haastavaa arvioida ja tämä saattaa vääristää tuloksia näiden osalta. Taulukossa 3 on esitetty edellä kuvatut tehoarviot pinta-alaan suhteutettuna.

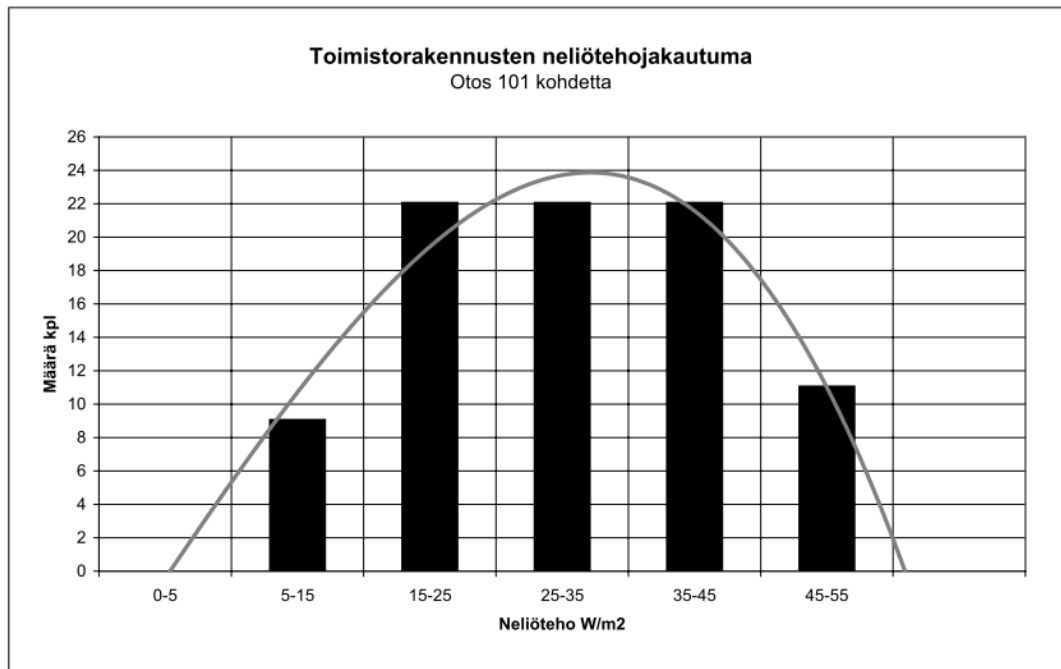
Taulukko 3. Koko kiinteistömäärän tehoarvot pinta-alaa kohden.

	Kerrosala, m ²	Arvio sähkötehosta, (W/m ²)				
		Ilmanvaihto	Jäähdytys	Valaistus	Sulapito (sähkö)	Yhteensä
Liikerakennukset	28320836	6	5	19	1	31
Toimistorakennukset	19229947	5	8	12	1	27
Opetusrakennukset	18104779	9	2	12	1	24

Edellä esitettyjä arvioita pinta-alaa kohden voidaan verrata ST-kortissa 13.31 esitettyihin koulu- ja toimistorakennusten huipputehojen ominaisarvoihin. Kuvissa 3 ja 4 on esitetty koulu- ja toimistorakennuksien neliötehojakaumat käytössä olevien kohteiden neliötehojakaumasta. Kuvaajista voidaan todeta, että tehovaihtelut ovat olleet varsin suuria tarkastelun kohteena olleissa kohteissa. (Sähkötieto ry, 2001) Tarkastelu on vuosien 1980 ja 2000 väliseltä ajalta. Koulurakennuksissa huipputeho on pääosin 15 – 35 W/m² ja toimistorakennuksissa 15 – 45 W/m². Näihin neliötehoihin verrattuna koko kiinteistömäärästä laskettujen kokonaistehojen voidaan olettaa olevan suuruusluokaltaan oikeaa luokkaa.



Kuva 3. Vuoden 1980 jälkeen rakennettujen tai saneerattujen kaukolämmitettyjen koulurakennuksien toteutuneet neliötehot (Sähkötieto ry, 2001).



Kuva 4. Vuoden 1980 jälkeen rakennettujen tai saneerattujen kaukolämmitettyjen toimistorakennuksien toteutuneet neliötehot (Sähkötieto ry, 2001).

4. KIINTEISTÖAUTOMAATIO KYSYNNÄN JOUSTOSSA

Kiinteistöautomaatio on kokonaisuus, jolla voidaan ohjata ja hallita koko kiinteistön taloteknisiä järjestelmiä. Näitä osajärjestelmiä ovat muun muassa ilmanvaihto, lämmitys, jäähdytys, valaistus sekä muut erillisjärjestelmät kuten turvallisuusjärjestelmät. (Piikkilä, 2012) Kiinteistöautomaation kannalta ei ole teknisesti esteitä millä tapaa kysynnän joustoon liittyvät ohjaukset tai tiedonsiirto välitetään järjestelmään. Erona eri ohjaustavoille on käytännössä vain se, kuinka monipuolisia ohjauksia voidaan toteuttaa kysynnän jouston kannalta.

Vaikka lähtökohtaisesti nykyaikaiset kiinteistöautomaatiojärjestelmät mahdollistavat erilaisten sähkökuormien ohjaamisen, voi kysynnän jousto asettaa järjestelmille myös uudenlaisia vaatimuksia. Vaatimusmäärittelyiden avulla voidaan asettaa järjestelmälle vaatimukset, jotka järjestelmän on toteutettava. Järjestelmävaatimukset voidaan jakaa toiminnallisiin ja ei-toiminnallisiin vaatimuksiin (Paakki, 2011).

Toimivan kokonaisuuden perusedellytys on eri järjestelmien integroitavuus. Tämä edellyttää yhteensopivia rajapintoja eri järjestelmien välille. Kiinteistöautomaatiojärjestelmien kannalta tämä tarkoittaa kysynnän joustossa rajapinnan määrittelyä sähköverkon tai muun palveluntarjoajan järjestelmiin. Älykkäiden sähköverkkojen standardointi on kehittymässä nopeaa vauhtia, mutta esimerkiksi yhtenäisiä käytäntöjä ei ole vielä muodostunut.

Seuraavissa kappaleissa kerrotaan tarkemmin automaatiojärjestelmien rakenteesta sekä millaisia toiminnallisia ja ei-toiminnallisia vaatimuksia tulee ottaa huomioon järjestelmäkokonaisuudessa. Lisäksi tuodaan esille millaisia rajapintatarpeita kiinteistöautomaatiojärjestelmien ja kiinteistöjen ulkopuolisten järjestelmien välillä kysynnän jouston kannalta tulee olemaan ja millaisia tiedonsiirtorajapintoja tällä hetkellä kehitetään ja on kehitetty vastaamaan näitä tarpeita.

4.1 Kiinteistöautomaatiojärjestelmät

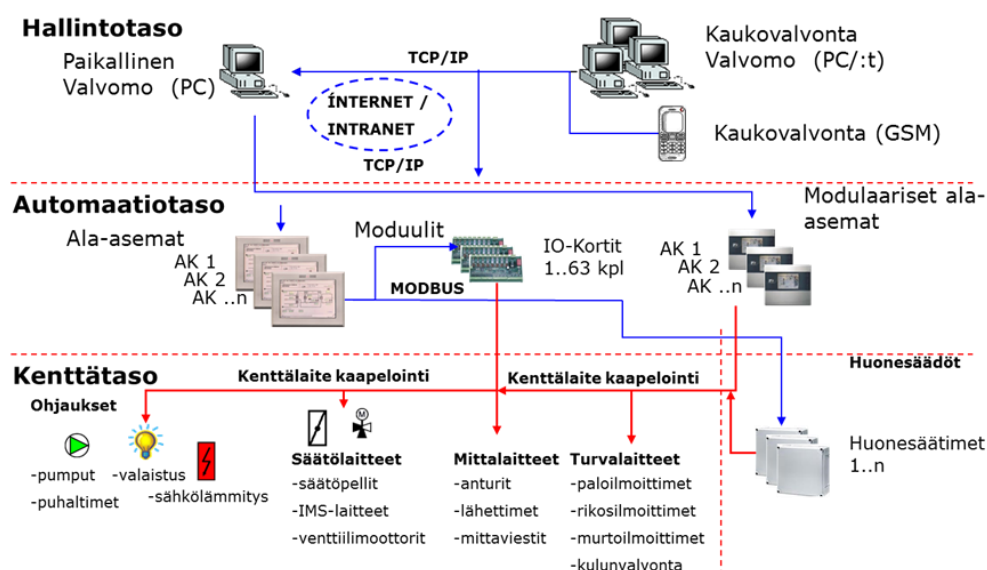
Kiinteistöjen automaatiojärjestelmien kehitys pohjautuu tällä hetkellä voimakkaasti informaatioteknologian kehitykseen (Piikkilä, 2012). TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) -pohjaiset toteutusratkaisut mahdollistavat automaation hajautamisen ja eri taloteknisten järjestelmien integroinnin. Perinteisesti kiinteistöautomaatio on pohjautunut keskitettyihin valvonta-alakeskuksiin. Tällöin älykkyys on alakeskusta-

son automaatiassa. Hajautettu automaatiassa älykkyys on hajautettuna eri osajärjestelmiin, kuten tilakohtaisiin säätöihin, ryhmäkeskus automaatioon, ilmanvaihtokoneisiin tai jäähdytyskoneille. Tällöin myös toiminnallisuuksien ohjelmointi on voitu hajauttaa eri osajärjestelmiin. Kysynnän jouston kannalta tämä tarkoittaa myös sitä, että kysynnän jouston toiminnalliset ohjaukset tulee toteuttaa kaikkiin niihin osa kokonaisuuksiin, joihin kysynnän joustoa halutaan toteutettavaksi. Tämä voi monimutkaistaa toimivan kokonaisuuden suunnittelua ja toteuttamisessa. Uudisrakentamisessa olisikin tärkeää, että kysynnän jouston tarpeet otettaisiin jo hankesuunnittelussa voimakkaasti esille.

Yleistä tai standardoitua määrittelyä kiinteistöjen automaatiojärjestelmien termistöstä ei suoraan ole. Tässä työssä suurempien kiinteistöjen automaatiojärjestelmistä käytetään termiä kiinteistöautomaatiojärjestelmät. Sen voidaan käsittää kattavan kaikki kiinteistöjen sisällä ja myös niiden läheisyydessä olevat järjestelmät. Rakennusautomaatio termiä kuvaa enemmän perinteisten LVI-järjestelmien, kuten lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon ohjaamista. Kiinteistöautomaatiojärjestelmä kokonaisuutena voi sisältää näiden lisäksi myös muita taloteknisiä järjestelmiä kuten turvallisuus-, valaistus- tai mittausjärjestelmiä. Pienasuntojen automaatiojärjestelmistä käytetään usein termiä koti-automaatio, joka myös terminä viittaa paremmin asuinrakennuksien järjestelmiin ja tarpeisiin.

4.1.1 Kiinteistöautomaatiojärjestelmien rakenne

Tavanomaisesti kiinteistöautomaatiojärjestelmä koostuu hierarkkisesta rakenteesta. Järjestelmä voidaan jakaa kolmeen päätasoon: hallinto-, automaatio- ja kenttätasoon. (Piikkilä, 2012) Kuvassa 5 on esitetty kiinteistöautomaatiojärjestelmän hierarkkinen rakenne.



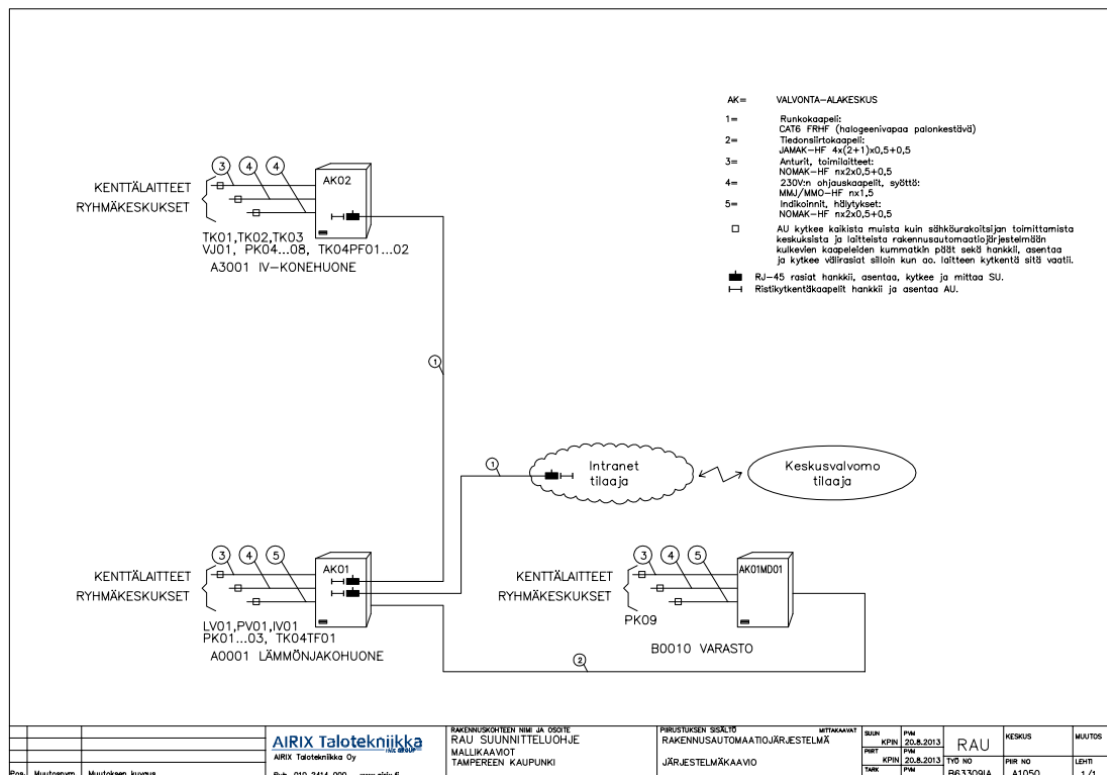
Kuva 5. Kiinteistöautomaatiojärjestelmän rakenne ja eri automaatiotasot (Piikkilä, 2012).

Hallintotason tehtävänä on toimia käyttörajapintana käyttäjien ja automaatiojärjestelmän välillä. (Piikkilä, 2012) Käytännössä tämä tarkoittaa joko paikallis- tai etävalvomoa. Valvomoiden perusta on graafinen käyttöliittymä, jolla voidaan hallita koko järjestelmän toimintaa. Valvomoissa hallitaan käyttäjien oikeuksia, määritellä tarvittavat hälytyskäsitteilyt sekä toteutetaan muun muassa kulutusraportointia ja trendiseurantoja.

Alakeskustason perustana ovat itsenäiset toimivat alakeskukset ja niihin liittyvät I/O -laitteet. Alakeskukset sisältävät ohjelmoitavat säätimet ja niihin ladatut alakeskusohjelmat, jotka ohjaavat I/O -pisteiden ja kenttälaitteiden välityksellä prosesseja. (Piikkilä, 2012) Alakeskukset voivat keskustella keskenään yleensä joko väyläprotokollan (esimerkiksi Modbus, LON, BACnet) tai TCP/IP -protokollan välityksellä.

Kenttätasolla tarkoitetaan ensisijaisesti antureita ja toimilaitteita sekä ohjattavia pumpuja ja taajuusmuuttajia. (Piikkilä, 2012) Kenttätasoksi voidaan määritellä myös itsenäiset säätimet, kuten huonesäätimet, jotka ohjaavat tilakohtaisia toimintoja.

Järjestelmä koostuu yleisesti valvonta-alakeskuksista, jotka ovat sijoitettuna ohjattavien prosessien läheisyyteen. Tyypillisesti alakeskukset ovat jaettuna esimerkiksi ilmanvaihtokonehuoneisiin, lämmönvaihtotiloihin ja sähköpääkeskustiloihin. Tällöin ohjauskäytöksi on toteutettu alakeskuksilta prosesseja ohjaaville kenttälaitteille ja ryhmäkeskusohjauksia varten jako- ja ryhmäkeskuksille. Kuvassa 6 on esitetty järjestelmäkaavio edellä kuvatusta kokonaisuudesta.



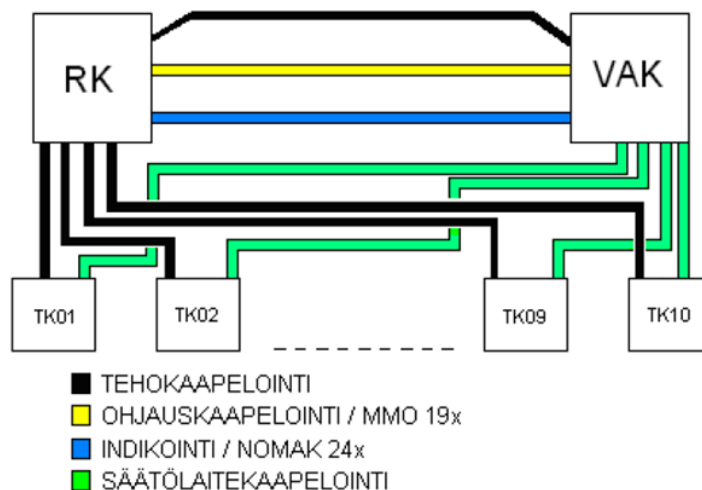
Kuva 6. Kiinteistöautomaatiojärjestelmän järjestelmäkaavio (Tampereen kaupunki, 2013).

Perinteinen tapa on toteuttaa automaatiojärjestelmä erillisillä alakeskuksilla, joihin on liitetty paljon automaatiopisteitä esimerkiksi useampi ilmanvaihtokone. Joissain tapauksissa on järkevää hajauttaa automaatiota sijoittamalla automaatiösäätimet lähemmäksi prosessia. Tällaisia esimerkkejä ovat esimerkiksi ilmanvaihtokoneiden tai sähkökeskusten yhteyteen toteutetut automaatiotratkaisut. Luvuissa 4.1.2 ja 4.1.3 on käsitelty keskitetyn ja hajautetun automaation eroa tarkemmin. Kysynnän jouston kannalta hajautettu automaatio voi mahdollistaa kuormakohtaisemman ohjauksen, mutta toisaalta saattaa monimutkaistaa toimintojen ohjelmointia.

4.1.2 Keskitetyt kiinteistöautomaatiojärjestelmät

Järjestelmäkokonaisuuksia, kuten useita ilmanvaihtokoneita, ohjataan tyypillisesti keskitetyn alakeskuksen ohjaamana. Tämä lisää järjestelmän haavoittuvuutta, koska saman alakeskuksen ohjattavissa voi olla useita osajärjestelmiä (Piikkilä, 2012). Keskitetty automaatio vaatii lisäksi raskaamman ryhmäkeskusten ja alakeskusten välisen kaapeloinnin. (Kaivo, 2006)

Järjestelmän ongelmana on sen haavoittuvuus ja jäykkyys, jota voidaan kuvata kuvan 7 mukaisella esimerkillä ilmanvaihdon keskitetystä ohjauksesta. Perinteisen järjestelmän kaapelointi on hyvin raskas. Ryhmäkeskukselta on tehosyöttö jokaiselle ilmanvaihtokoneelle erikseen. Järjestelmä vaatii säätölaitekaapeloinnin kentälaitteille sekä ryhmäkeskusohjauksia varten omat kaapelointinsa. (Kaivo, 2006)



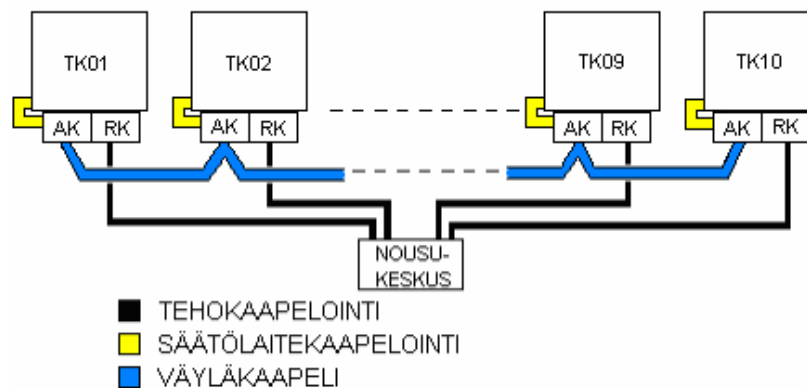
Kuva 7. Keskitetyn automaatiojärjestelmän rakenne (Kaivo, 2006).

Vastaavasti muilla ryhmäkeskusohjauksilla, kuten sulatusohjauksilla tai ulkovalaistusohjauksilla, ryhmäkeskusten ja alakeskusten väliset ohjaukset joudutaan toteuttamaan raskaan kaapeloinnin avulla. Tämä nostaa yksittäisen automaatio-ohjauspisteen hintaa ja tämän takia tavanomaisesti automaatio-ohjauksia toteutetaan tarkoin harkitusti vain tarpeellinen määrä. Kysynnän jouston ohjausten kannalta kuormat tulisi olla ryhmi-

tetty usein tarkemmin, mikä vain lisäisi kaapeloinnin tarvetta perinteisellä toteutusmallilla.

4.1.3 Hajautetut ja integroidut kiinteistöautomaatiojärjestelmät

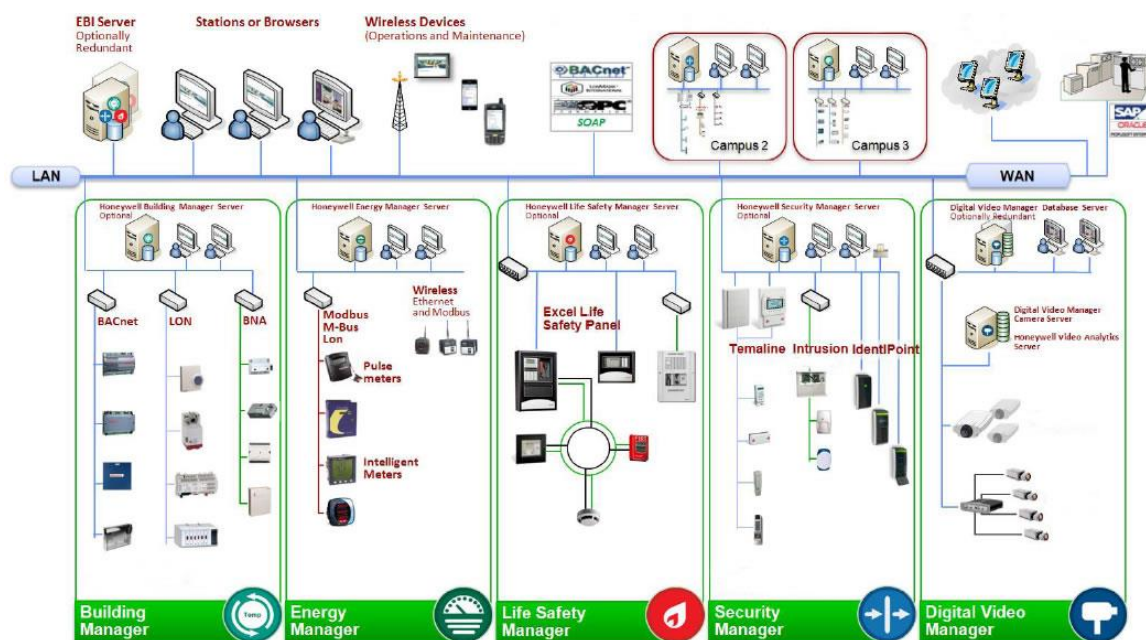
Kiinteistöautomaatiojärjestelmien älykkyys on ohjelmistossa, joka voidaan hajauttaa eri tasoille ja laitteille. (Piikkilä, 2012) Hajautetuissa automaatiojärjestelmissä automaatio voidaan hajauttaa esimerkiksi tuloilmakonekohtaisesti. Kuvassa 8 on kuvattuna hajautetun automaation kokonaisuus ilmanvaihtokoneiden osalta.



Kuva 8. Hajautetun automaatiojärjestelmän rakenne (Kaivo, 2006).

Ilmanvaihtokoneet voidaan toimittaa jo valmiiksi omalla automatiikallaan, joka on mahdollista liittää kohteen muuhun kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Nämä ratkaisut ovat yleistymässä myös suurempien ilmanvaihtokoneiden osalta. Tällöin järjestelmät ovat nopeita käyttöönottaa ja paikallinen automaatio voidaan liittää muuhun järjestelmään esimerkiksi väylä- tai TCP/IP – liitynnällä. Normaalista ilmanvaihtokoneen toiminnasta poikkeavat toiminnot, kuten kysynnän jouston ohjaukset tulisi ottaa tässä tapauksessa huomioon jo koneen mukana toimitettavassa automaatio-ohjelmoinnissa.

Integroiduilla kiinteistöautomaatiojärjestelmillä tarkoitetaan kokonaisuutta, joihin on voitu liittää useita eri taloteknisiä järjestelmiä. Näitä ovat tyypillisesti esimerkiksi turvallisuuden liittyvät järjestelmät, kuten kameravalvonta-, murtohälytys- ja paloilmoitinjärjestelmät. (Piikkilä, 2012) Lisäksi erilaiset energianhallinta- ja valaistuksenohjausjärjestelmät ovat yleistyneet suuremmissa kiinteistöissä. Nämä ovat mahdollista liittää muuhun kiinteistöautomaatioon. Kuvassa 9 on esitetty integroitu talotekninen kokonaisuus.



Kuva 9. Esimerkki integroidusta automaatiojärjestelmästä (Honeywell, 2015).

4.2 Toiminnalliset ja ei-toiminnalliset vaatimukset kysynnän jouston näkökulmasta

Kysynnän joustoon liittyvät ohjaukset ovat normaalista käyttötoiminnasta poikkeavia toimintoja, eivätkö normaali tilanteessa näin ollen saa myöskään aiheuttaa haittaa tai häiriötä käyttäjille. Jotta voidaan suunnitella toimivia ratkaisuja kiinteistökuormien kysynnän joustoon, on määriteltävä millaisia toiminnallisia vaatimuksia se järjestelmille asettaa. Nämä tulisi määritellä ja ottaa huomioon jo hankesuunnittelussa.

Toiminnallisiksi vaatimuksiksi kiinteistöautomaatiojärjestelmille kysynnän jouston näkökulmasta voidaan pitää muun muassa järjestelmien reaaliaikaisuutta, ohjaustoimintojen priorisointia, sähkökuormien tilan mittaamista ja todentamista, järjestelmien integroitavuutta sekä tietoturvaan liittyviä asioita. Nämä asettavat järjestelmille rajoituksia esimerkiksi tiedonsiirtonopeuteen, rajapintayhteensopivuuteen ja toimintavarmuuteen liittyen.

Toiminnallisten vaatimusten lisäksi järjestelmille voidaan asettaa ei-toiminnallisia vaatimuksia. Ei-toiminnallisia vaatimuksia ovat esimerkiksi lainsäädäntö ja määräykset rakennusten minimiolosuhteille sekä sähkökomponenttien IP (Ingress Protection) – luokitukset. Ei-toiminnallisilla vaatimuksilla tarkoitetaan reunaehtoja tai rajoituksia, jotka asettavat rajat kysynnän jouston ohjaustoiminnoille. Erilaiset määräykset ja säädökset asettavat esimerkiksi reunaehdot sisäilmasto-olosuhteille.

4.2.1 Kysynnän jouston ohjauksissa huomioitava lainsäädäntö, määräykset ja standardit

Voimassa olevat rakentamiseen liittyvät lait, määräykset ja standardit asettavat reunaehdot kysynnän jouston ohjauksille. Lait ja määräykset ovat velvoittavia, ohjeistukset ja standardit eivät. Välillisesti kiinteistökuormien ohjaukseen liittyviä määräyksiä ja standardeja on olemassa. Muun muassa sisäilman laatuun, valaistusolosuhteisiin, sähkömittausten toteuttamiseen sekä järjestelmien turvallisuuteen on otettu kantaa rakennusmääräyskokoelmissa ja eri standardeissa. Nämä on otettava huomioon kysynnän joustoa toteutettaessa. Taulukossa 4 on yhteenvetona eri järjestelmiin kohdistuvia määräyksiä, ohjeistuksia sekä standardeja, jotka toimivat reunaehtoina kuormien ohjauksille kysynnän jouston kannalta.

Taulukko 4. Yhteenveto rakentamiseen liittyvistä määräyksistä ja standardeista, jotka liittyvät taloteknisiin järjestelmiin ja toimintaan.

Kiinteistö-automaatio	SFS-EN 15232: Rakennusten energiatehokkuus. Rakennusautomaation, säädön ja kiinteistönhoidon vaikutus energiatehokkuuteen (2012)
	SFS-EN 50491-4-1: Yleiset toiminnallisen turvallisuuden vaatimukset rakennusten elektronisiin järjestelmiin (HBES) ja rakennusautomaatio- ja ohjausjärjestelmiin (BACS) integroitaville tuotteille (2012)
	prEN 50491-12: Smart grid - Application specification - Interface and framework for customer (valmisteilla)
Ilmanvaihto	Rakentamismääräyskokoelma D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet (2012)
	Sisäilmastoluokitus 2008: Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset (2009)
Valaistus	SFS-EN 12464-1: Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus (2011)
	Rakentamismääräyskokoelma D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet (2012)
Mittaus	Rakentamismääräyskokoelma D3: Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet (2012)

Seuraavissa osioissa on kuvattu tarkemmin edellä mainittujen määräysten, ohjeistuksien sekä standardien sisältöä kysynnän jouston näkökulmasta. Luvussa 6 on lisäksi pohdittu millaisia muutoksia tai kehitystarpeita nykyisiin säädöksiin olisi kysynnän jouston kehittämiseksi.

Kiinteistöautomaatio

Vaatimuksia kiinteistöautomaatiojärjestelmien suunnitteluun tai toteutukseen ei Suomessa ole. Paikallisia ohjeistuksia järjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen on kuitenkin olemassa. Näitä ovat esimerkiksi kaupunkien tai kuntien suunnitteluohjeet omiin kohteisiinsa.

Urakointiin liittyviä pätevyyskysymyksiä on mahdollista hakea henkilö- ja yritysarviointi SETI Oy:stä. SETI on vuoden 2013 alusta myöntänyt lakisääteisiä pätevyystodistuksia rakennusautomaatiourakointiin. Rakennusautomaatiourakoitsijahyväksyntä on mahdollista saada yritykselle, joka asentaa ja/tai ylläpitää rakennusautomaatiojärjestelmiä sekä täyttää vaadittavat urakoitsijakriteerit. Lisäksi on mahdollista hakea rakennusautomaatiohenkilöpätevyydet henkilölle, jolla on rakennusautomaatiotöihin soveltuva automaatio- tai sähköalan koulutus ja vaadittava työkokemus rakennusautomaatioalalta. (SETI Oy, 2015)

Muulla tavoin Suomessa ei ohjata kiinteistöautomaatiojärjestelmien suunnittelua tai toteutusta tällä hetkellä. Automaatiojärjestelmät ovat kuitenkin keskeisessä roolissa energiatehokkaiden kiinteistökokonaisuuden toteuttamisessa sekä tulevaisuudessa älykkäissä kiinteistöratkaisuissa, joiden yksi toiminnallisuus tulee olemaan kysynnän jousto.

Kiinteistöautomaatiojärjestelmiin liittyviä standardeja on Suomessa standardisarjassa SFS-EN 50491: Yleiset vaatimukset kotien ja rakennusten elektroniikkajärjestelmille (HBES) sekä rakennusautomaatio ja ohjausjärjestelmille (BACS). Standardisarjan osassa 4, Yleiset toiminnallisen turvallisuuden vaatimukset rakennusten elektroniikan järjestelmiin (HBES) ja rakennusautomaatio- ja ohjausjärjestelmiin (BACS) integroitaville tuotteille (2012), käsitellään muun muassa laitteiden etäohjausta. Standardissa otetaan kantaa muun muassa etäohjattavien laitteiden tai pistorasiaryhmien merkitsemiseen ja soveltuvuutta etäohjaukseen (Sesko ry, 2012). Valmisteilla olevassa standardisarjan osassa 12, prEN 50491-12: Smart grid - Application specification - Interface and framework for customer, tullaan määrittelemään vaatimukset sähköverkon ja rakennuksen data- ja kommunikaatorajapinnalle (CENELEC, 2014). Tätä standardia käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.4.

Rakennusten energiatehokkaasta käytöstä rakennusautomaation avulla on käsitelty standardissa SFS-EN 15232 (Rakennusten energiatehokkuus - Rakennusautomaation, säädön ja kiinteistönhoidon vaikutus energiatehokkuuteen, 2012). Standardin esittämä kerroinmenetelmä perustuu energiatehokkuuteen vaikuttavien automaatiotoimintojen arviointiin. Standardissa on määritelty neljä eri energiatehokkuusluokkaa kiinteistöautomaatiojärjestelmille kattavaksi niin asuinrakennuksissa kuin muissa kiinteistöissä. Taulukossa 5 on kuvattu standardissa esitetyt eri energiatehokkuusluokat. (SFS, 2012)

Taulukko 5. Rakennusautomaation energiatehokkuusluokat (SFS, 2012).

Luokitus	Järjestelmä	Kuvaus
A	Integroidut hallintajärjestelmät	vastaa korkean energiatehokkuuden mahdollistavaa automaatio- ja hallintajärjestelmää sekä etäkäytettävää ja – valvottavaa järjestelmää (valvomo)
B	Rakennuksen automaatiojärjestelmä	vastaa edistynyttä rakennuksen automaatiota, jossa on joitakin erikseen mainittuja hallintatoimintoja (kuten tilakohtaiset säädöt)
C	Automaattinen ohjaus- ja säätö	vastaa toteutustasoa, jossa on automatisoitu minimitaso
D	Manuaalinen käyttö	vastaa tehotonta rakennusautomaatiota

Luokan A järjestelmiä voidaan kuvata integroiduiksi järjestelmiksi, joissa esimerkiksi erilliset mittaus- ja valaistuksenohjausjärjestelmät ovat liitetty kokonaisuudeksi. Järjestelmää tulee lisäksi pystyä käyttämään etäkäytettävän valvomon avulla. (SFS, 2012) Tämä mahdollistaisi jo lähtökohtaisesti monipuoliset kysynnän jouston ohjaukset. Luokan C järjestelmät ovat kuitenkin edelleen hyvin yleisiä, varsinkin kohteissa, joissa rakennuskustannukset on pyritty saamaan mahdollisimman alas. Kysynnän jouston kannalta voidaan pitää minimivaatimuksena luokan B järjestelmiä ja taasen suositeltavana luokkana luokan A järjestelmiä. Integroidut järjestelmät voisivat mahdollistaa esimerkiksi valaistuksen ohjaamisen kysynnän jouston kannalta sekä riittävän sähkön mittauksen kiinteistöissä.

Ilmanvaihto

Ilmanvaihtoon liittyvät määräykset ja suositukset liittyvät sisäilman laatuun ja energiatehokkuuteen. Kiinteistöjen ilmanvaihtoon ja sisäilmaston laatuun liittyviä ohjeistuksia ja määräyksiä käsitellään Rakentamismääräyskokoelma D2:ssa (Rakennusten sisäilma-asto ja ilmanvaihto, 2012), Rakentamismääräyskokoelma D3:ssa (Rakennusten energiatehokkuus, 2012) sekä niitä tarkentavassa Sisäilmastoluokitus 2008:ssa. Rakentamismääräyskokoelmissa esitetyt määräykset ovat velvoittavia, ohjeistukset harkinnan varaisia.

Rakentamismääräyskokoelmassa D2 otetaan kantaa rakennusten ilmanvaihdon vaatimuksiin. Tämän mukaan tiloissa tulee olla ilmanvaihto, jolla käyttöaikana taataan terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu. D2:ssa rakennukset jaetaan ilmanvaihdon osalta asuinrakennuksiin ja muihin kuin asuinrakennuksiin. (Ympäristöministeriö, 2011)

Asuinrakennusten osalta käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihto tulee olla minimissään 60 % käyttöajan ilmapirrasta, jolloin asuinrakennusten koneellista ilmanvaihtoa ei saisi lainkaan pysäyttää. Muiden kuin asuinrakennusten ilmanvaihto voidaan suunnitella si-

ten, että käyttöajan ulkopuolella rakennuksessa tulee ylläpitää minimi ulkoilmavirtaa tai vaihtoehtoisesti riittävä ilmanvaihto voidaan ylläpitää joko katkomalla ilmanvaihdon käyntiä tai pitämällä hygieniatilojen ilmanvaihtoa päällä. Tällöin käyttöajan ulkopuolinen ilmanvaihdon pysäyttäminen on mahdollista. (Ympäristöministeriö, 2011)

Sisäilmastoluokitus 2008 täydentää rakentamismääräyskokoelman esitystä laadukkaan ja terveellisen sisäilmaston määritelmästä. Sisäilmastoluokitus 2008:ssa sisäilmastoluokitus on kolmitasoinen. Laatuluokat ovat yksilöllinen sisäilmasto (S1), hyvä sisäilmasto (S2) ja tyydyttävä sisäilmasto (S3). Luokitusten tavoitearvot ovat pyritty asettamaan siten, että luokka S3 vastaa maankäyttö- ja rakennuslain vaatimuksia sisäilman laadusta, joka ei terveille henkilöille aiheuta terveyshaittaa mikäli kohteessa on toimiva ilmanvaihto eikä erityisiä epäpuhtauslähteitä ole. Laatuluokat S1 ja S2 kuvaavat sisäilmaston laatua, joka muun muassa vähentää terveyttä ja viihtyvyyttä vaarantavia riskejä. Sisäilmaston laatuun vaikuttavat muun muassa ilman hiilidioksidipitoisuus, lämpötila ja valaistusolosuhteet sekä muut ilman epäpuhtauksitekijät. (Rakennustieto Oy, 2012)

Ilmanlaaduntavoitearvojen pysyvyyttä voidaan tarkastella hiilidioksidipitoisuuden yhden tunnin liukuvan keskiarvon avulla. Liukuvan keskiarvon avulla voidaan suodattaa muun muassa mittauksista turhat häiriöt. Ilmanlaadun tavoitearvot ja olosuhteiden pysyvyys vaatimukset on esitetty taulukossa 6. (Rakennustieto Oy, 2012)

Taulukko 6. Ilman laadun tavoitearvot Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaan (Rakennustieto Oy, 2012).

	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuus	<750 ppm	<900 ppm	<1200 ppm
Olosuhteiden pysyvyys (käyttöajasta)			
*toimi- ja opetustilat	95 %	90 %	
*asunnot	90 %	80 %	

Korkein laatuluokka S1 (Yksilöllinen sisäilmasto) asettaa ilmanlaadun tavoitearvoiksi, että tilan hiilidioksidipitoisuuden tulee pysyä alle 750 ppm. Luokitus määrittelee lisäksi olosuhteiden pysyvyydeksi esimerkiksi toimi- ja opetustiloille minimissään 95 % käyttöajasta. Mikäli tilojen normaali käyttöaika olisi esimerkiksi 10 tuntia (7-19), tarkoittaisi tämä sitä, että olosuhteet saisivat ylittää sallitun hiilidioksidipitoisuuden (750 ppm) 0,5 tunnin ajan. Vastaavasti laatuluokan S2 kohdalla tämä tarkoittaisi, että olosuhteet saisivat ylittää sallitun hiilidioksidipitoisuuden (900 ppm) yhden tunnin ajan. Käyttöajan ulkopuolisiin ylityksiin ei ole sisäilmastoluokituksessa otettu kantaa.

Yksittäiset ja hetkelliset ilmanvaihdon pysäyttämiset tai käynnin pudottamiset eivät täten välttämättä vaaranna tilojen ilmanlaatuoluokitusta tilojen käyttöajan aikana. Tällöin sisäilman laadun todentaminen edellyttää kuitenkin riittävän osin olosuhdemittauksia tiloista. Olosuhdemittauksien avulla voitaisiin myös taata rakentamismääräyskokoelman

mukainen terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu vaikka ilmanvaihdon käyntiä pudotettaisiinkin hetkellisesti. Rakentamismääräyskokoelman D3 määritelmä ilmanvaihtokoneiden pysäyttämistä ei ole täten täysin yksiselitteinen. Koneiden pysäyttäminen ei suoraan olisi sallittua, vaikka olosuhdemittauksin voitaisiinkin todentaa sisäilman laadun riittävyys.

Valaistus

Standardissa SFS-EN 12464-1 (Valoja valaistus - Työkohteiden valaistus - Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus) käsitellään laadukkaan, energiatehokkaan ja tarpeen mukaisen valaistuksen toteuttamista. Standardissa määritellään muun muassa minitavoitearvot eri tilojen valaistukselle. (SFS, 2010)

Lisäksi valaistuksen energiatehokkuutta käsitellään rakentamismääräyskokoelma D3:ssa sekä sisäilmastoluokitus 2008:ssa verrataan valaistuksen tavoitearvoja sisäilmastoluokituksiin. Energiatehokkuutta myös valaistuksen osalta tullaan tarkentamaan tulevaisuudessa rakentamismääräyskokoelmissa (Ympäristöministeriö, 2014). Tämä ohjaa säädetävän ja tarkemmin ohjattavissa olevan valaistuksen toteuttamiseen ja voi täten edesauttaa valaistuksen käyttöön ottamista myös kysynnän joustoon.

Sähkön mittaus

Sähkön mittaus on keskeisessä roolissa kysynnän joustossa. Reservikäyttöön ohjatun kuorman tila ja sen hetkinen teho on tiedettävä. Rakentamismääräyskokoelma D3:ssa (Rakennusten energiatehokkuus, 2012) otetaan kantaa sähkön mittaamiseen vain kevyesti.

Rakentamismääräyskokoelmassa edellytetään, että rakennukset varustetaan energiankäytön mittauksella tai mittausvalmiudella, jotta rakennuksen ja energiamuotojen käyttöä voidaan helposti selvittää (Ympäristöministeriö, 2011). Käytännössä tämä ei siis edellytä mittauksien toteuttamista. Lisäksi D3:ssa todetaan, että mittauksista voidaan luopua mikäli mittauksen tai mittausvalmiuden toteuttaminen voidaan osoittaa epätaroituksenmukaiseksi (Ympäristöministeriö, 2011). Taulukossa 7 on koottuna sähkön mittaamiseen liittyvät kohdat Rakentamismääräyskokoelma D3:sta.

Taulukko 7. Rakennusmääräyskokoelma D3:n sähkön mittaukseen liittyvät kohdat (Ympäristöministeriö, 2011).

Kohta	Selite
2.8.1.1	Rakennukset varustetaan sähkönmittauksella, josta saadaan tieto rakennuksen koko sähköenergiankulutuksesta.
2.8.1.4	Muiden kuin käyttötarkoituusluokan 1 rakennusten ilmanvaihtojärjestelmä varustetaan sähkönkulutuksen mittauksella lukuun ottamatta vähäisiä erillispoistoja. Ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava ja rakennettava siten, että järjestelmän ominaissähköteho voidaan helposti mitata.
2.8.1.5	Muiden kuin käyttötarkoituusluokan 1 (erilliset pientalot sekä rivi- ja ketjutalot) rakennusten jäähdytysjärjestelmä varustetaan sähkönkulutuksen mittauksella. Jäähdytysjärjestelmä on suunniteltava ja rakennettava siten, että järjestelmän ottama sähköteho ja tuottama jäähdytysenergia voidaan helposti mitata.
2.8.1.6	Muissa kuin käyttötarkoituusluokan 1 ja 2 (erilliset pientalot, rivi- ja ketjutalot sekä asuinkerrostalot) rakennuksissa kiinteä valaistusjärjestelmä varustetaan sähkönkulutuksen mittauksella.

Määrittelyn mukaan liike-, toimisto- ja koulurakennukset tulee siis varustaa (tai varautua mittausvalmiudella) sähkön kulutuksen päämittauksella, ilmanvaihtojärjestelmän kulutuksen ja sähkötehon mittauksella sekä jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutuksen ja sähkötehon mittauksella. Lisäksi valaistusjärjestelmän sähkönkulutus tulee mitata.

Tällä hetkellä rakennusmääräyskokoelman D3 määritelmät eivät ole yksiselitteiset ja toteutetut ratkaisut vaihtelevatkin paljon. D3:ssa ei oteta myöskään kantaa siihen, tulisi-ko mittaus liittää esimerkiksi kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Rakentamismääräyskokoelmat ovat uudistumassa ja tarkentumassa muun muassa näiltä osin (Ympäristöministeriö, 2014). Kysynnän jouston edistämisen kannalta olisi tärkeää, että uudistetuissa määräyksissä otettaisiin tarkemmin kantaa muun muassa sähkötehon mitaamiseen sekä mittauksen etäluentaan ja reaaliaikaisuuteen.

4.2.2 Taloteknisten järjestelmien ohjaustoimintojen priorisointi

On huomioitava, että taloteknisiltä järjestelmiltä edellytetään tiettyjä toimintoja järjestelmien hallittuun ja turvalliseen toimintaan, joita ei ole toistaiseksi toteutettu kysynnän jouston näkökulmasta. Esimerkiksi kysynnän joustosta saatavaa taloudellista hyötyä ei tulisi tavoitella olosuhteiden kustannuksella. Vastaavasti kiinteistöjen turvallisuuteen liittyvät toiminnot ja ohjaukset asettuvat aina kysynnän joustun ohjausten edelle. Tiedyt kysynnän joustoon liittyvät ohjaukset, kuten sähköverkon häiriötilanteiden välttäminen, voivat kuitenkin asettua toimintojen priorisoinnissa esimerkiksi olosuhteiden edelle. Tästä syystä toiminnallisuudet on määriteltävä jo suunnittelussa. Kansallisia ohjeistuksia ja suosituksia ei suunnittelun toteuttamiseksi tästä näkökulmasta toistaiseksi ole.

Taloteknisten järjestelmien toimintaan liittyviä määräyksiä on kuvattu rakentamismääräyskokoelmissa. Esimerkiksi ilmanvaihtokoneisiin liittyen Rakentamismääräyskokoelman osassa D2, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, on vaadittu järjestelmältä tiettyjä turvalliseen toimintaan liittyviä minimivaatimuksia. Määräys vaatii muun muassa, että ilmanvaihtojärjestelmä (Ympäristöministeriö, 2011)

- ”varustetaan ohjaus-, säätö- ja valvontalaitteilla, joiden avulla järjestelmän toimintaa voidaan ohjata ja seurata.”
- ”on suunniteltava ja rakennettava siten, että sen koneissa ja laitteissa on suoja- ja varolaitteet huoltoa ja kunnossapitoa varten.”
- ”on suunniteltava ja rakennettava siten, että sen toiminta voidaan hälytystilanteessa kokonaisuudessaan pysäyttää selvästi merkityllä pysäytyskytkimellä. Pysäytyskytkimen tulee olla helposti saavutettavassa paikassa.”
- ”ilmavirtoja on voitava ohjata kuormituksen ja ilman laadun mukaan käyttötilannetta vastaavasti.”

Kysynnän jouston toimintoja määriteltäessä on otettava huomioon esimerkiksi edellä kuvatut toiminnot. Ilmanvaihtojärjestelmän turvallisuuteen liittyvät toiminnot, kuten pysäytys hätätilanteessa, tulee asettua aina kysynnän jouston ohjausten edelle.

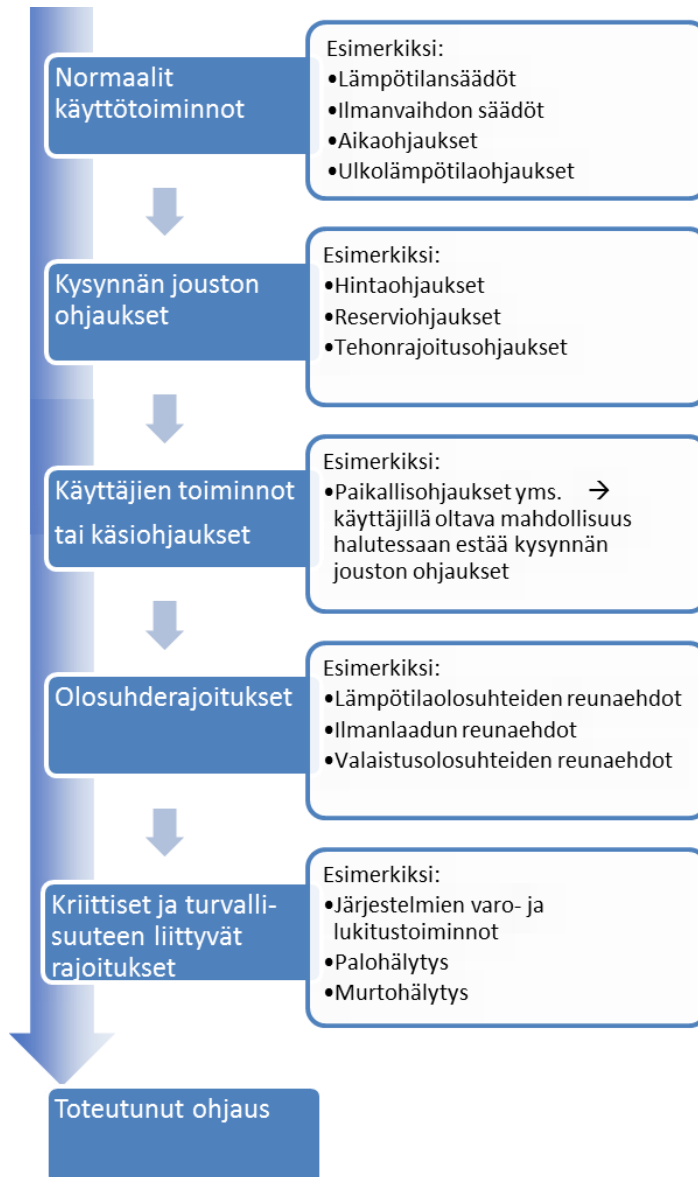
Paikalliset suunnitteluohjeet voivat sisältää tarkempia vaatimuksia järjestelmien ohjauksille, säädöille ja valvonnalle. Esimerkiksi Tampereen kaupungin tilakeskuksella on omat ohjeistuksesta kiinteistöautomaatiojärjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen. (Tampereen kaupunki, 2014) Tällä hetkellä käytössä olevissa suunnitteluohjeissa mainitaan muun muassa ilmanvaihtokoneen toiminnasta seuraavasti (Tampereen kaupunki, 2013):

- ”Käyttötoiminnoissa kuvataan yksiselitteisesti laitteiden väliset toiminnalliset yhteydet normaalissa käyttötilanteessa, kuten puhaltimien toiminnalliset yhteydet, ilmapeltien ja säätötoimintojen toiminnalliset yhteydet laitteiden toimintaan.”
- ”Kohdassa voidaan myös kuvata tarkemmin käyttökohdassa viitattuja monimutkaisempia käynnistäviä ja pysäyttäviä toimintoja, kuten yötuuletusta.”
- ”Varotoiminnoissa kuvataan yksiselitteisesti varotoiminnot, kuten IV-pysäytyspalonrajoitus, IV-verkoston häiriö, kanavan ali- ja ylilämpö, jäätymissuoja ja lämmityspatterin pumpun lukitus.”
- ”Varotoimintojen yhteydessä on kerrottava mahdollisen kuittauksen tarve sekä kuinka ja mistä kuittaus tapahtuu.”

Edellä kuvatut toiminnot tulee huomioida kiinteistöautomaatiojärjestelmien suunnitteluasiakirjoissa. Järjestelmien toimintaselostuksissa voidaan muun muassa kuvata millaisia varo- ja lukitustoimintoja järjestelmän tulee sisältää (Piikkilä, 2012). Kysynnän jouston ohjausten suhde muihin toimintoihin tulee esittää selkeästi juuri näissä toimintaselos-

tuksien kuvauksissa. Automaatio-ohjelmointi toteutetaan toimintaselostuksia vastaaviksi.

Ohjauksissa on huomioitava lisäksi käyttäjien mahdollisuus estää halutessa kysynnän jouston ohjaukset. Lisäksi tietyissä tapauksissa, kuten pistorasiaryhmien ohjaamisessa, on käyttäjille oltava mahdollista osoittaa tieto kysynnän jousto-ohjauksen toiminnasta. (Sesko ry, 2012) Kuvassa 10 on esitetty malli eri ohjaustoimintojen priorisoinnista. Vastaavat kuvaukset voisivat olla pohjana kysynnän jouston toimintojen määrittelemiseksi eri taloteknisille järjestelmille.



Kuva 10. Automaatio-ohjausten priorisointi.

4.2.3 Kuormien todentaminen

Kysynnän jousto asettaa uudenlaisia tarpeita ja vaatimuksia myös sähkön mittaamiseen. Perinteisen energiamittauksen lisäksi on oleellista mitata ja tietää kuormien käyttämä reaaliaikainen teho. Perinteisesti mittaukset on voitu toteuttaa esimerkiksi pulssimittauksin, mutta reaaliaikaisuus edellyttää mittausjärjestelmiltä sekuntiluokan mittaustaajuutta. Tämä on mahdollista käytännössä vain väyläpohjaiseen tiedonsiirtoon perustuvilla mittauksilla.

Mikäli kiinteistökuormia ohjataan sähkövoimajärjestelmän reservikäyttöön, on toteutuneen kuorman todentaminen välttämätöntä (Fingrid Oyj, 2015). Mittaustiedon avulla järjestelmän on mahdollista todeta esimerkiksi sen hetkinen potentiaali kuorman pudotukseksi (Schneider Electric, 2011). Lisäksi mittaustietojen perusteella voidaan todeta kuorman ohjauksen toteutuminen ja toteutuneen tehon pudotuksen suuruus esimerkiksi laskutusta varten. Tällöin kiinteistökuormien mittausjärjestelmät tulisi toteuttaa siten, että mittaustieto on mahdollista välittää esimerkiksi kiinteistöautomaatiojärjestelmän kautta kysynnän jouston palveluntarjoajalle.

Kysynnän jouston kannalta tarvitaan sekä laite- että järjestelmäkohtaista mittausta. Laitekohtaisten tehotietojen seuranta ja liittämistä kiinteistöautomaatioon voidaan jo tällä hetkellä edellyttää paikallisissa suunnitteluohjeistuksissa (Tampereen kaupunki, 2013). Laitekohtainen tehotieto on mahdollista saada väylätietona esimerkiksi ilmanvaihtokoneiden puhaltimia ohjaavilta taajuusmuuttajilta (Danfoss, 2015). Lisäksi eri järjestelmiltä kuten jäähdytys- tai valaistusjärjestelmän kuluttama sähköteho on tänä päivänä mahdollista saada liitettyä väyläliityntänä kiinteistöautomaatioon.

Ryhmäkeskustason ohjaukset vaativat usein erillisen mittauksen toteuttamista. Nykyaikaiset väyläliitäntäiset mittalaitteet mahdollista reaaliaikaisen ja kiinteistöautomaatiojärjestelmiin liitettävissä olevan toteutuksen. Kysynnän jouston edistämiseksi tulisi kiinteistöjen sähkökuormien jälkimittauksista olla selkeämmät ohjeistukset esimerkiksi rakentamismääräyskokoelmassa.

4.2.4 Tiedonsiirtoon liittyvä tietoturva

Sähkölaitteistojen, taloteknisten järjestelmien sekä sähkönjakeluverkon yhdistyminen älykkääksi verkoksi ja näiden järjestelmien liittäminen ulkoiseen viestintäverkkoon asettaa haasteita niin tietoturvaan kuin yksityisyydensuojaankin liittyen. (DR-pooli, 2015). Kiinteistöautomaatiojärjestelmien hallinta pohjautuu yhä voimakkaammin web-sovelluksiin pohjautuviin valvomoratkaisuihin. Useimmat järjestelmistä ovat liitettynä kiinteistön sisäiseen verkkoon ja tätä kautta tarvittavin yhteyksin taloverkon ulkopuolelle. Kiinteistöautomaatiojärjestelmiin liittyvien käytössä olevien ratkaisuiden erot tietoturvassa ovat suuret. Mikäli kiinteistöjen tietoverkot liittyvät sähkönjakeluverkon tietoverkkoihin, voi sähkönjakelun turvallisuus vaarantua merkittävästi.

Kiinteistöautomaatiojärjestelmien tietoturva voi koostua sekä tiedonsiirron tietoturvasta että fyysisestä tietoturvasta. Tiedonsiirron tietoturva käsittää muun muassa käytetyt tiedonsiirtoprotokollat ja toteutetut salaukset. Fyysisellä tietoturvalla tarkoitetaan esimerkiksi itse valvomokoneiden tietoturvaa tai valvomo-ohjelmistojen salasanojen turvallista hallintaa.

Aalto-yliopiston vuonna 2013 valmistuneessa raportissa *Suomen automaatioverkkojen haavoittuvuus* on selvitetty verkkoon liitettyjen automaatoratkaisuiden tietoturvatilannetta. Raportissa mainitaan hälyttäviä löytöjä muun muassa kiinteistöautomaatiojärjestelmien tietoturvassa. (Tiilikainen & Manner, 2013)

Kiinteistöautomaatiojärjestelmien tietoturva on tällä hetkellä muutoinkin kuuma aihe. Joulukuussa 2014 ilmestyneessä Sähkömaailma-lehden artikkelissa, *Kiinteistöautomaatio on herkkä verkkohyökkäyksille*, Tieran teknologia-arkkitehti ja Tietoturva ry:n hallituksen jäsen Janne Ollenberg tuo esiin verkkohyökkäysten mahdollisuuden myös kiinteistöautomaatiojärjestelmiä kohtaan. Artikkelissa tuodaan esiin että tällä hetkellä talotekniikan alan toimijat eivät yleisesti pidä kiinteistöjen tietojärjestelmiin kohdistuvia hyökkäyksiä uhkana. Kuitenkin julkisia yhdyskäytäviä ja yleisiä tiedonsiirtoprotokollia käytettäessä mahdollisuus on olemassa. Lisäksi artikkelissa todetaan, että kiinteistöautomaatio ohjaa usein kriittisiä järjestelmiä kuten laitejäähdytyksiä tai lukituksia (Pentikäinen, 2014). Jäähdytyksen pysäyttäminen esimerkiksi verkkolaitteiden tai suurempien toimistorakennusten konesalien osalta voi aiheuttaa käyttäjille merkittävää haittaa. Lukitusten ohjaaminen kiinteistöautomaatiojärjestelmien kautta voi mahdollistaa myös fyysisen turvallisuusriskin kohteessa. Artikkelissa mainitaan, että ohjeistus kiinteistöautomaatiojärjestelmien tietoturvan toteuttamiseksi on tulossa vuoden 2015 aikana (Pentikäinen, 2014). Tulevaa ohjeistusta voidaan pitää lähtökohtana kiinteistöautomaatiojärjestelmien tietoturvalle myös kysynnän jouston kannalta.

Ratkaisuja muun muassa kiinteistöautomaatiojärjestelmien etäkäytön turvalliseen toteuttamiseen on jo kuitenkin olemassa. Esimerkiksi Soneran tarjoama Alerta Pro ratkaisun tietoturvan taso on saanut viranomaishyväksynnän. Yhteyttä voidaan hyödyntää esimerkiksi palo-, murto ja kiinteistöautomaatiojärjestelmien tietoliikenneyhteydeksi palveluntuottajan valvomojärjestelmään. (TeliaSonera Finland Oyj, 2014)

4.3 Avoimeen tiedonsiirtoon perustuvat rajapinnat kiinteistöjen ja sähköverkon rajapinnassa

Älykkäiden sähköverkkojen tiedonsiirron standardointi on kehittynyt nopeasti viime vuosien aikana. Muun muassa hajautetun tuotannon, verkon kaksisuuntaisuuden ja sähköautojen latauspisteiden lisääntyminen on asettanut uudenlaisia vaatimuksia sähköverkon tiedonsiirrolle. Jo tällä hetkellä kehitettyjen ratkaisuiden määrä on hyvin suuri. On tärkeää, että olemassa olevista ratkaisuista pystytään valitsemaan parhaiten soveltuvat yhteisen kehitystyön lähtökohdaksi (DR-pooli, 2015).

Tiedonsiirron tarve eri järjestelmien ja palveluiden välillä tulee kasvamaan ja tiedonsiirron reaaliaikaisuus on yhä tärkeämmässä roolissa tulevaisuudessa niin kiinteistöjen kuin sähköverkkojenkin tiedonsiirrossa. Älykkäiden sähköverkkojen älykkyys piilee tiedonsiirtoon sekä tiedonsiirron mahdollistamiin palveluihin ja toimintoihin fyysisten toimintojen taustalla.

Kysynnän jouston kannalta yhtenäistä standardointia tiedonsiirtoon ja kommunikointiin eri järjestelmien ja toimijoiden välillä ei ole vielä tällä hetkellä yleisesti käytössä. Erilaisia tiedonsiirtomalleja on kehitetty ja ainakin pilottiluonteisesti jo toiminnassa. Standardoinnin kannalta merkittävimmät haasteet liittyvät tiedonsiirtoprotokollien ja eri järjestelmien tietomallien määrittelyihin. Eri osa-alueiden, kuten rakennusten kiinteistöautomaation, sähköjakeluautomaation, sähkön myyjän palveluiden tai hajautetun pientuotannon osajärjestelmien sovittaminen toimimaan yhteisillä säännöillä on haasteellista.

Eri järjestelmille ja toimijoille tulee määritellä yhteisesti sovitut selkeät tekniset vaatimukset ja rajapinnat (DR-pooli, 2015). Yhteensopivuuden saavuttamiseksi on eri sovel-lusalueilla käytettyjen protokollien ja rajapintojen pystyttävä toimimaan osana älykästä sähköverkkoa ja esimerkiksi kysynnän jouston palveluita ja toimintoja. Yksi vaihtoehto eri tietomallien integroimiseksi on kanonisen tietomallin hyödyntäminen.

Kilpailu eri tiedonsiirtoprotokollien standardoimisesta on kovaa. Useat järjestöt, tutkimuslaitokset ja yritykset ympäri maailmaa ovat kehittäneet omia tiedonsiirtoprotokollia kysynnän joustoon liittyen ja pyrkivät voimakkaasti ajamaan omaa tuotettaan standardoiduksi malliksi.

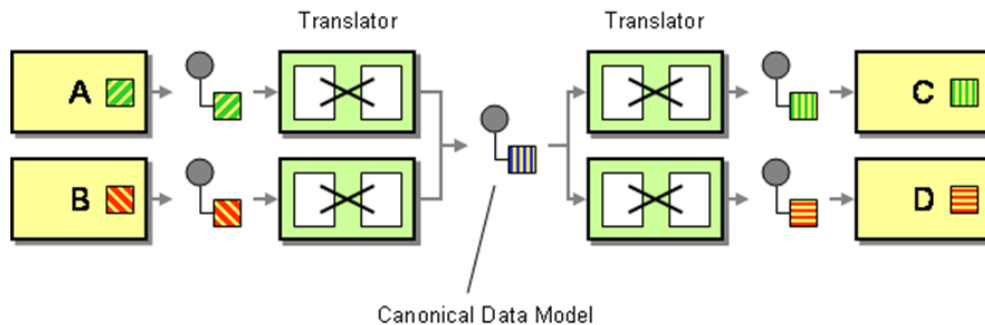
Standardoinnin tulisi kattaa kommunikointiyhteys myös kiinteistöihin asti. Kiinteistökuormien ohjaaminen tehokkaasti kysynnän jouston kannalta edellyttäisi avointa rajapintaa myös kiinteistöjen järjestelmien ja ulkopuolisten järjestelmien välille. Suurena haasteena niin älykkäiden sähköverkkojen kuin kysynnän joustonkin kannalta on tiedonsiirtojärjestelmien ja – mallien integraatio sekä standardoitu kommunikointi.

Tässä työssä keskitytään kiinteistöjen puolen rajapintoihin ja otetaan kantaa siihen, miten ne liittyvät sähköverkon hallintaan käytettyjen tietojärjestelmien tämän hetkisiin käytössä oleviin standardeihin. Seuraavissa osioissa esitetään katsaus tämän hetken tilanteesta ja siitä, millaisia tiedonsiirtomalleja on tällä hetkellä hyödynnetty tai ollaan kehittämässä kiinteistöjen rajapinnan kommunikointiin.

4.3.1 Kanoninen tietomalli

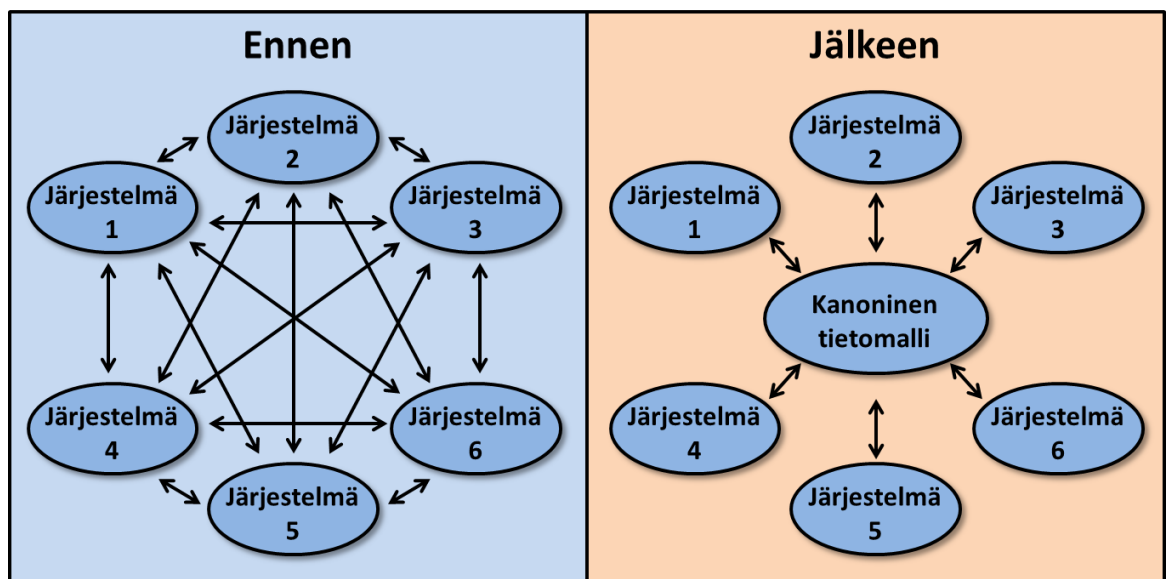
Järjestelmä- ja tietoverkkojen integraation yhtenä haasteena on, että itsenäisesti kehitetyt sovellukset käyttävät usein eri tietoformaatteja. Näiden välisissä integraatioissa voitaisiin hyödyntää kanonista tietomallia.

Kanoninen malli on muista sovelluksista riippumaton tapa muuntaa tieto yhteismitalliseen muotoon, ja samalla vähentää riippuvuuksia järjestelmiä integroitaessa. Tästä on hyötyä varsinkin useita sovelluksia integroitaessa. Kanoninen malli edellyttää, että eri sovellukset tuottavat ja käyttävät viestejä yleisessä kanonisessa mallissa. Kuvassa 11 on esitetty eri sovellusten välisen kanonisen tietomallin yhteydet. (Hohpe & Woolf, 2011)



Kuva 11. Kanonisen tietomallin rakenne (Hohpe & Woolf, 2011).

Kanoninen malli tuottaa vaihtoehtoisen tason yksittäisten sovellusten formaateille. Uuden sovelluksen liittäminen integroituun kokonaisuuteen edellyttää näin ollen vain muunnoksen kanoniseen malliin. (Hohpe & Woolf, 2011) Kuvassa 12 on esitetty useiden eri sovellusten integraatio kanonista mallia hyödyntäen.



Kuva 12. Kanoninen tietomalli sovellusten integraatiossa (perustuu lähteeseen (Hohpe & Woolf, 2011)).

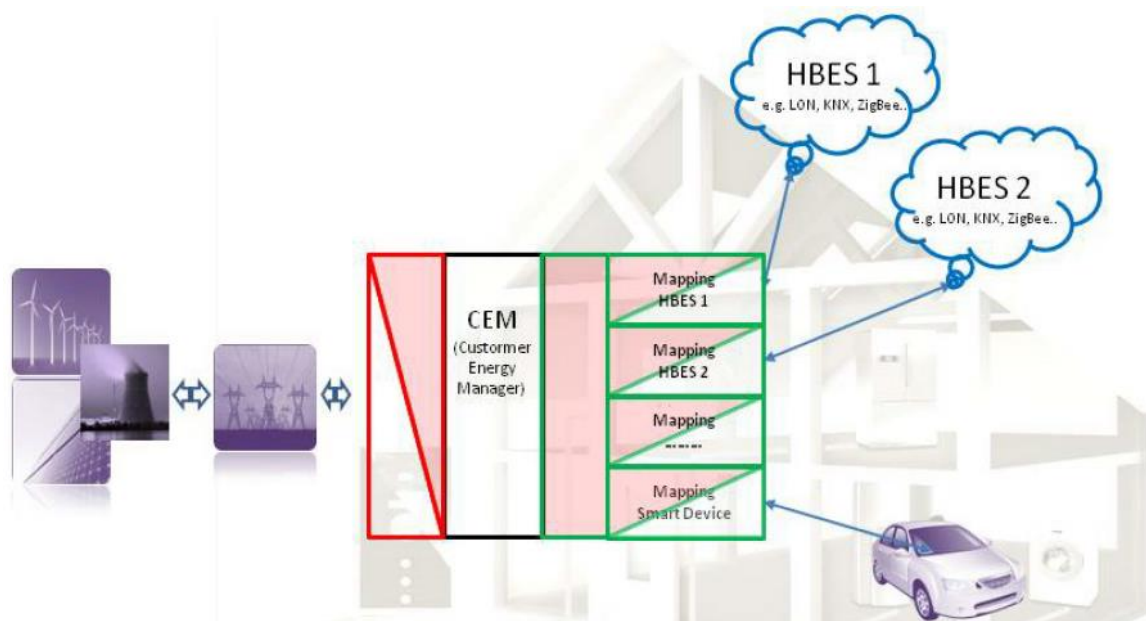
CIM (Common Information Model) tietomallia voidaan pitää yhtenä kanonisena tietomallina. Sen tavoitteena on yhdenmukaistaa eri järjestelmien välistä kommunikointia sekä saavuttaa ristiriidattomia rajapintoja mahdollistaen järjestelmien kehittymisen järkevin kustannuksin. (Britton, 2009) IEC (International Electrotechnical Commission)

vastaa CIM mallin kehittämisestä. CIM tietomallin hyödyntämisestä kiinteistöjen rajapinnassa kerrotaan tarkemmin kappaleessa 4.3.3.

4.3.2 Rakennusten ja sähköverkon välisen tiedonsiirron standardi prEN 50491-12

Euroopassa sähköverkkojen ja kiinteistöjen verkkojen välisen rajapinnan standardointia ollaan laatimassa teknisen komitean CENELEC TC 205 Home and Building Electronic Systems (HBES) toimesta. Standardisarjaan EN 50491: Yleiset vaatimukset kotien ja rakennusten elektroniikkajärjestelmille (HBES) sekä rakennusautomaatio ja ohjausjärjestelmille (BACS, Building Automation and Control System) on valmisteilla lisäosana standardi prEN 50491-12: Smartgrid – Application specification – Interface and framework for customer, jonka tarkoituksena on standardoida suositukset sähköverkon ja kiinteistöjen verkkojen väliselle rajapinnalle. (CENELEC, 2014) Tämä mahdollistaa kaksisuuntaisen tiedonsiirron sähköverkkojen ja kiinteistöjen välille.

Kommunikointi sähköverkon ja asiakaspään laitteiden ja järjestelmien välillä kuvataan standardissa toteutuvan CEM:n (Customer Energy Management) rajapinnan välityksellä. CEM:llä kuvataan järjestelmää tai ohjelmistoa, joka niin sanotusti kokoaa siihen liitetyt laitteet ja järjestelmät sekä sovittaa näiden tiedonsiirtoprotokollat keskustelemaan kiinteistöjen ulkopuolisten verkkojen ja järjestelmien kanssa. Yhteensopivuus sähköverkkojen suuntaan taataan standardisarjaan IEC 62746 pohjautuen. Sanomien esitystavat älykkäille laitteille sekä kiinteistö- ja kotiautomaatiojärjestelmiin on määritelty taa-sen standardiluonnoksessa prEN 50491-12. Kuvassa 13 on esitetty yleiskuva standardissa esitetyn rajapinnan rakenteesta. (CENELEC, 2014)



Kuva 13. Standardin prEN 50491-12 yleiskuva rajapinnasta (CENELEC, 2014).

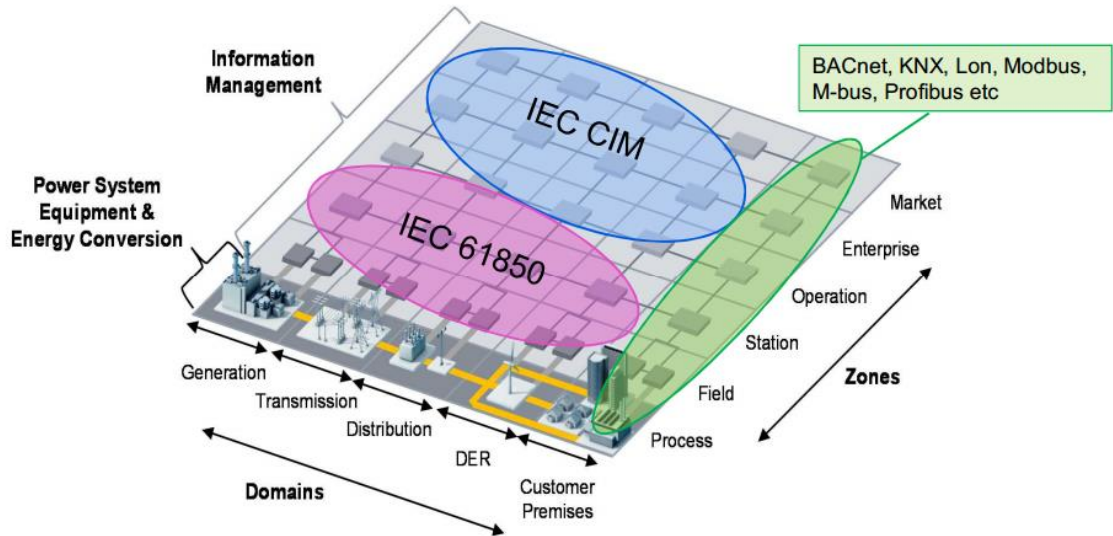
Standardoidut määritelmät on koottu kuvaamaan rajapinnan tietorakenteen sekä viestimallit. Mahdollistaen yhteensopivuudet, kuvaukset ovat määriteltä mahdollisimman tarkasti käyttäen hyväksi XSD (XML Schema Definition) mallia. Tällöin standardi ei ota tarkemmin kantaa mitä kieltä tai formaattia rajapinnassa käytetään. (CENELEC, 2014) Tämän työn kirjoitushetkellä standardi on äänestys- ja kommentointivaiheessa ja äänestys on päättymässä 13.2.2015. (CENELEC, 2014)

4.3.3 CIM – tietomalliin pohjautuva kiinteistöjen rajapinta, IEC 61968-9 CIM

Common Information Model (CIM) on yleinen abstrakti tietomalli sähköverkkoalan tietojen mallintamiseen. Abstraktilla tietomallilla tarkoitetaan mallia, jota ei ole sidottu mihinkään tiettyyn toteutusteknologiaan. Tietomalli koostuu standardeista IEC 61970–301 ja IEC 61968–11, joista ensimmäinen sisältää semanttisen mallin sähköverkon komponenttien ja niiden välisten suhteiden mallintamiseen, ja toinen laajentaa mallia sähköjakelualalla tarvittavilla tiedoilla, kuten omaisuuden hallinnalla, töiden aikatauluksella ja asiakkaiden laskutuksella. (McMorran, 2007)

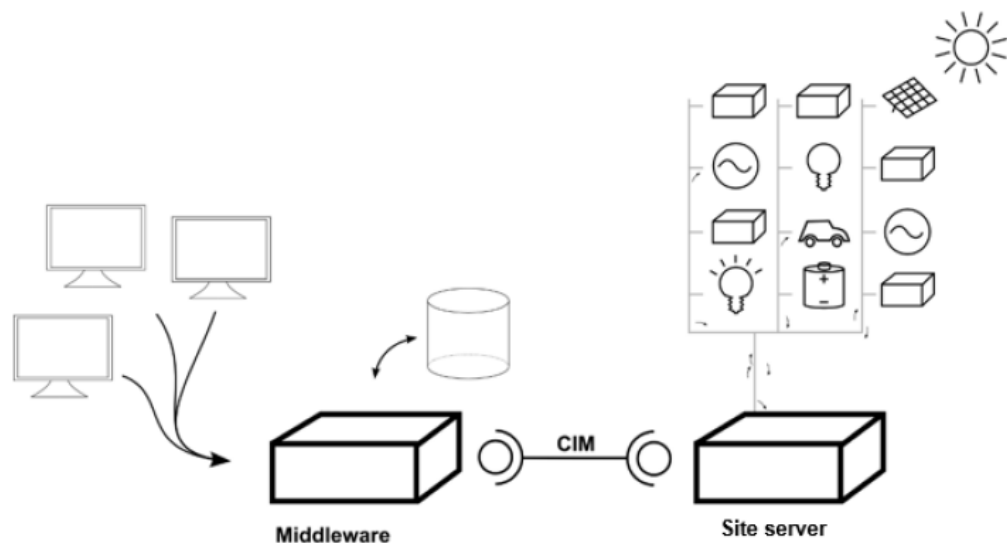
Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat (SGEM) – tutkimusohjelman yhteydessä on selvitetty mahdollisuutta palveluntarjoajien, kuten sähkön myyjien, ja älykkäiden kuluttajalaitteiden väliseen kommunikointiin. Selvityksen tuloksena on toteutettu määrittelyt palveluiden ja laitteiden väliselle kommunikoinnille, joka pohjautuu CIM – tietomalliin ja sen kansalliseen tai vähintään Helsen Sähköverkko Oy:n hyväksymään tulkintaan. (ABB, 2014)

Tietomallin määrittelyt perustuvat standardeihin IEC 61968-1: Interface architecture and general requirements, edition 2.0 ja IEC 61968-100: Implementation Profiles for IEC 61968. Standardia IEC 61968-100 hyödynnetään kuvaamaan viestipakettia ja standardia IEC 61968-9: Interface Standard for Meter Reading & Control tarkemmin viestin määrittelyyn. (ABB, 2014) Kuvassa 14 on kuvattu IEC CIM rajapinnan suhdetta sähköverkon ja kiinteistöjen hallinnan tietojärjestelmiin.



Kuva 14. IEC CIM rajapinnan suhde muihin standardeihin (ABB, Smart Grid Control, Adjustment and Connection to Building Automation, 2014).

Kahden järjestelmän välinen avoin rajapinta ja järjestelmäkokonaisuus on esitetty kuvassa 15. Site server:ä voidaan pitää esimerkiksi talokohtaisena serverinä, joka kokoaa useita eri järjestelmälaitteita tai yksittäisiä laitteita yhteen. Site server tukee eri tiedonsiirtoprotokollia laitteiden suuntaan ja kommunikoi ulospäin IEC CIM rajapintaa hyödyntäen. Middleware voidaan ymmärtää palvelun tarjoajan järjestelmänä joka muodostaa käyttöliittymän esimerkiksi älykkäiden laitteiden ohjaamiseen tai mittausdatan tallentamiseen. (ABB, 2014)



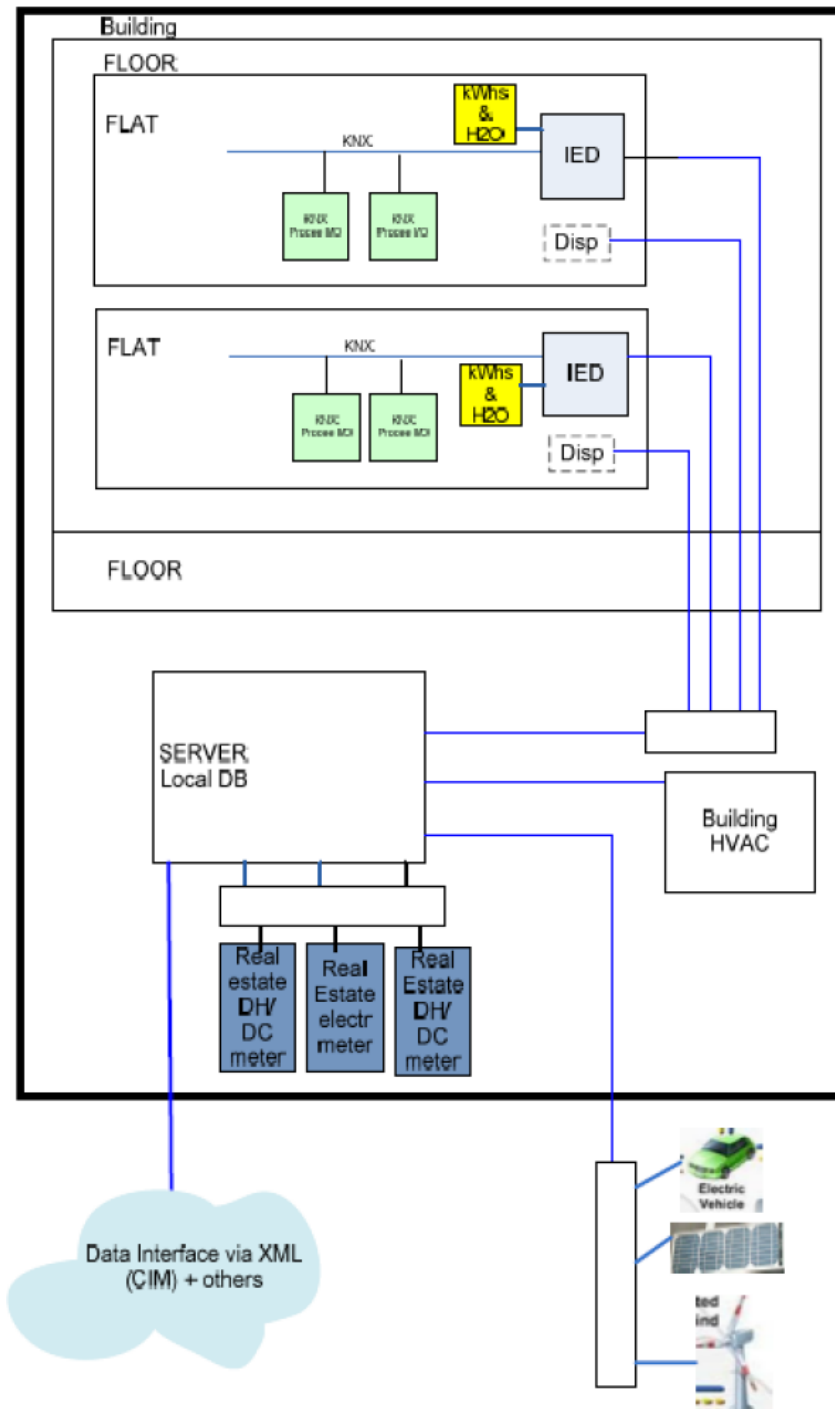
Kuva 15. IEC CIM rajapinnan kuvaus (ABB, 2014).

Rajapintamäärittely kuvaa tämän hetkessä kokonaisuudessaan muun muassa kuinka voidaan (ABB, 2014):

- vastaanottaa ja tunnistaa tietoja paikallispalvelimelta palveluntarjoajan järjestelmään.
- lähettää ohjaustoimintoja palveluntarjoajan järjestelmästä paikallispalvelimelle ja sitä kautta toteutettavaksi älykkäille laitteille.
- vastaanottaa sanomia palveluntarjoajan järjestelmään kohteessa tapahtuvista tapahtumista, kuten painikkeiden tilatiedoista tai hälytyksistä.
- tiedustella järjestelmän tilaa, kuten lähettää pyyntöjä ohjattavissa olevien laitteiden tilasta.

IEC 61968-9 CIM on monipuolinen ja avoin älykkään sähköverkon kommunikaatiorajapinta, joka mahdollistaa kaksisuuntaisen tiedonsiirron. Tiedonsiirto perustuu XML (eXtensible Mark-up Language) sanomiin TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) verkossa ja tiedonvälityksessä hyödynnetään HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure) protokollaa, mikä mahdollistaa tarvittavan tietoturvan toteuttamisen. (ABB, 2014)

CIM-tietomalliin pohjautuva rajapinta on valittu kansallisessa SGEM-tutkimusohjelmassa soveliaimpana ratkaisuna. Avoin rajapinta mahdollistaa eri laite- ja järjestelmätoimittajien sekä eri palveluntarjoajien yhteistoiminnan sekä niiden kilpailuttamisen. Suomessa ensimmäisenä kyseistä rajapintaa hyödynnetään ja otetaan käyttöön Kalasatamassa kahdessa kerrostalokohteessa. (ABB, 2014) Rajapinta ulkoisiin sähköenergian käytön tieto- ja ohjausjärjestelmiin on ehdotettu toteutettavaksi muun muassa kuvan 16 esitetyn periaatekuvan mukaisesti kiinteistökohtaisen palvelimen kautta. (Helsingin kaupunki, 2013)



Kuva 16. Kalasataman suunnittelumalli taloautomaatiojärjestelmän rakenteesta (Kalasataman älykkäät energiajärjestelmät, ohje suunnittelijalle, 2013)

Rajapintaa voidaan hyödyntää muun muassa hajautettujen resurssien mittaamiseen, ohjaamiseen ja hallintaan, mittausten ja tilatietojen keruuseen, ohjausten asetusarvojen lähettämiseen, kysynnän joustoon ja esimerkiksi kodin valvontaan. (ABB, 2014)

4.3.4 OpenADR -järjestön kehittämä rajapinta kysynnän joustoon

Kalifornian sähkökriisin seurauksena Yhdysvalloissa kysynnän jouston tutkimus käynnistyi voimakkaasti viime vuosikymmenen alussa. Tämän seurauksena Lawrence Berkeley National Laboratory:n (LBNL) kysynnän jouston tutkimuskeskus on kehittänyt avointa kommunikointirajapintaa kysynnän jouston tarpeisiin. Tuloksena on kehitetty kansainvälisesti tunnistettu standardi automaattiseen kysynnän joustoon. (OpenADR Alliance, 2013)

OpenADR 2.0 määrittelee vuorovaikutuksen ADR palvelimen/palvelun ja asiakkaan välille käyttämällä XML viestejä ja IP tekniikoita viestien luomiseen ja lähetykseen (OpenADR Alliance, 2013). OpenADR:n on tarkoitus mahdollistaa myös yhteensopivuus CIM -tietomalliin.

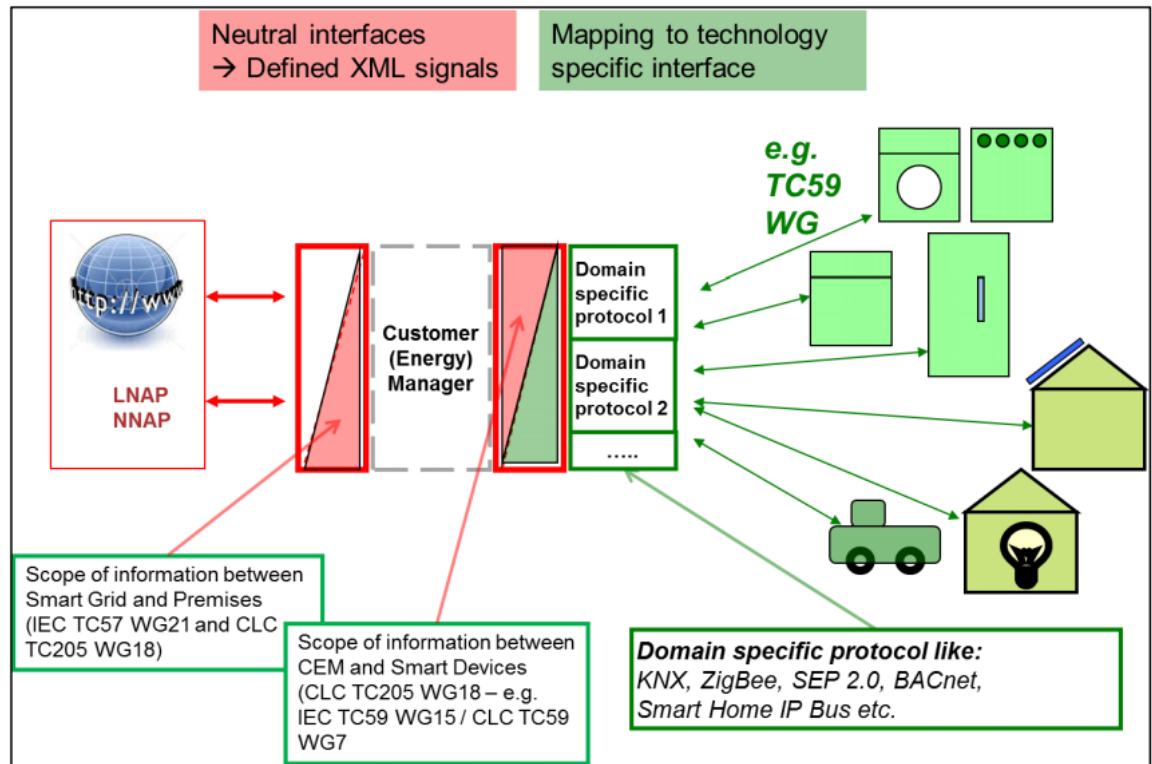
Kysynnän joustomarkkinoiden kehitys Yhdysvalloissa on aikaansaanut sen, että vuoteen 2013 mennessä yli 250 MW Kalifornian julkisen sektorin ja teollisuuden sähkökuormista on otettu käyttöön OpenADR:n ensimmäistä versiota 1.0 hyödyntäen. (OpenADR Alliance, 2013)

Useiden laitevalmistajien järjestelmät ja laitteet tukevat jo tällä hetkellä OpenADR:n kommunikointirajapintaa. Jäseninä järjestössä on lukuisia suuria sähköalan yrityksiä. Kiinteistöautomaatiojärjestelmien toimittajista ovat mukana muun muassa Schneider Electric, Siemens ja Honeywell. Näiltä järjestelmätoimittajilta löytyy jo tällä hetkellä tuotteita ja järjestelmäkokonaisuuksia perustuen OpenADR:n malliin. (OpenADR Alliance, 2015)

4.3.5 EEBus

EEBus Initiative e.V. on voittoa tavoittelematon järjestö, jonka tavoitteena on yhdistää alan johtavat yritykset, yhdistykset ja sidosryhmät niin Saksassa kuin kansainvälisestikin energia-, tietoliikenne- ja sähköalalla. Yhteistyössä eri osapuolten kanssa on tarkoitus kehittää avoin, standardoitu ja yhteisesti tuettu kommunikointiprotokolla. Ensisijainen tavoite on mahdollistaa älykkäiden sähköverkkojen ja kuluttajapään järjestelmien välinen kommunikointi. (EEBus Initiative e.V., 2014)

Kuten standardiluonnoksessa prEN 50491-12, EEBus:ssa kuvataan kommunikointi CEM rajapinnan välityksellä. Määrittelyt kattavat muun muassa älykkäiden sähkömittareiden ja yksittäisten älykkäiden laitteiden kommunikoinnin kiinteistöjen ulkopuolisiin järjestelmiin sekä kuormien hallinnan esimerkiksi kysynnän jouston näkökulmasta. EEBus on alusta kokonaisvaltaiselle liitettävyydelle. Kuvassa 17 on kuvattu EEBus rajapintoja ja osajärjestelmien kokonaisuus. (EEBus Initiative e.V., 2013)



Kuva 17. Kuvaus EEBus mallin rajapinnasta (EEBus Initiative e.V., 2013).

EEBus malli on kansainvälisen standardoinnin myötä saavuttamassa hyväksynnän yleisesti hyväksytyksi ja avoimeksi standardiksi. Kansainvälinen yhteistyö hallitsevien koti- ja kiinteistöautomaatioon liittyvien tiedonsiirtoprotokollien, kuten BACnet, LON, KNX ja ZigBee, kanssa edesauttaa standardointia. (EEBus Initiative e.V., 2014)

5. CASE-KOHTEEN KENTTÄKOKEIDEN TULOKSET

Ilmanvaihdon ja valaistuksen soveltuvuutta kysynnän joustoon tutkittiin käytännön kuormanohjauskokein. Kuormien soveltuvuutta selvitettiin ennen kaikkea sähkövoimajärjestelmän reserveiksi tarjottavan kysynnän jouston näkökulmasta. Tällöin keskeisiä ominaisuuksia sähkökuormien ohjattavuuteen ovat muun muassa kuormien nopea ohjattavuus, kuorman suuruuden ja tilan reaaliaikainen todentaminen sekä riittävän suuren kuormanohjauspotentiaalin omaaminen. Käyttäjien näkökulmasta on asetettava reunaehdot kysynnän jouston toimintojen vaikutuksesta olosuhteiden laatuun. Vertailuarvoina olosuhteille voidaan pitää määräysten ja standardien suosituksia.

Seuraavaksi kuvataan tutkimusasetelmat sekä esitetään kenttäkokeiden tulokset. Lisäksi kuvataan kuinka mittauksien perusteella on voitu analysoida tarkasteltujen sähkökuormien käyttäytymistä. Ilmanvaihdon ja valaistuksen tuloksia on käsitelty muun muassa tehopotentiaalin, olosuhdevaikutusten ja tarvittavien muutosten näkökulmasta.

5.1 Tutkimusasetelman kuvaus

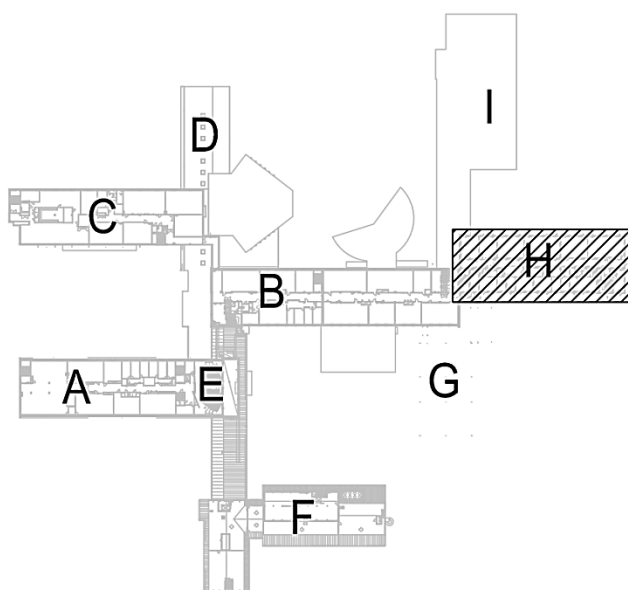
Koejärjestelyt toteutettiin Tampereen ammattikorkeakoulun tiloissa vuonna 2013 peruskorjatussa rakennusosassa. Kohteessa on täten nykymääräyksiin toteutetut talotekniset järjestelmät ja kohde kuvaa hyvin tällä hetkellä rakennettavien rakennusten taloteknistien järjestelmien soveltuvuutta kysynnän joustoon. Koejärjestelyjä tehtäessä oli mahdollista todeta millaisia muutoksia olemassa olevat kohteet ja niiden järjestelmät vaatisivat, jotta kysynnän joustoa voitaisiin toteuttaa. Samalla voitiin huomioida millaisia asioita tulisi ottaa jo suunnittelussa ja järjestelmien toteutuksessa huomioon.

Ilmanvaihdon soveltuvuutta testattiin pysäyttämällä ilmanvaihtokoneet hetkellisesti sekä pudottamalla koneiden ilmamäärät noin 40–50 %:iin normaalin käyttöajan ilmamäärästä 15 minuutin ajaksi. Testijakson aikana seurattiin ohjauksen vaikutuksia tilojen hiilidioksidipitoisuuksiin ja todettiin mittauksin toteutunut tehopudotus. Lisäksi toteutettiin yhden ilmanvaihtokoneen osalta toinen koekäyttö, jossa automaatio-ohjelmaa muutettiin siten, että haluttu tehopudotus saatiin toteutumaan mahdollisimman nopeasti. Tavoitteena oli saavuttaa mahdollisimman suuri tehopudotus mahdollisimman nopeasti.

Valaistusjärjestelmän soveltuvuutta testattiin kohteen valaistuksen suhteen yhden kerroksen osalta. Nykyiseen valaistusjärjestelmään tehtiin tarvittavat muutokset, jotta järjestelmää voitiin testata kysynnän jouston kannalta. Ohjauksen vaikutuksia valaistusolo-

suhteisiin arvioitiin mittaamalla tilojen valaistusvoimakkuuksia sekä kahdella eri oppilasryhmälle tehdyllä kyselyllä.

Kenttäkokeet suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun vuonna 2013 peruskorjatussa H-rakennuksessa. Rakennusosan kerrosala on noin 6800 brm² ja rakennusosa koostuu viidestä kerroksesta. Tiloissa on viiden eri koulutusohjelman opetustiloja sekä henkilökunnan työhuoneita. Kerrokset on jaettu vyöhykkeisiin, joissa tilan halki kulkevan käytävän toisella puolella on opetustiloja ja toisella työhuoneita. (Arkkitehtitoimisto Lasse Kosunen Oy, 2010) Kuvassa 18 on esitetty kohteen eri rakennusosat ja tummennettuna tarkastelussa ollut H-rakennus.



Kuva 18. TAMK:n eri rakennusosien pohjakuva (AIRIX Talotekniikka, 2011).

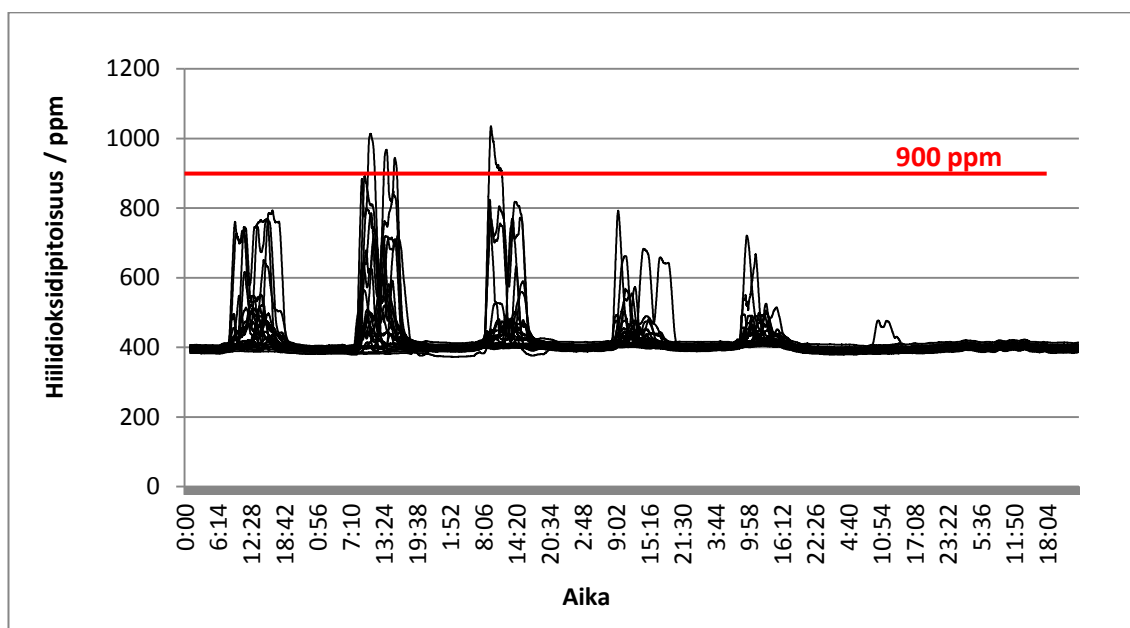
Koko rakennuksen kiinteistöautomaatio on toteutettu Schneider Electric:n kiinteistöautomaatiojärjestelmällä. Järjestelmää voidaan hallita keskitetysti web-sovelluspohjaisen kiinteistöautomaatiovalvomon kautta. Järjestelmä pohjautuu väyläteknikkaan ja koostuu useista valvonta-alakeskuksista. Kiinteistöautomaatiojärjestelmällä voidaan ohjata ja valvoa kohteessa muun muassa ilmanvaihtoa, lämmitystä, jäähdytystä, huonekohtaisia lämmitys-, jäähdytys- ja ilmamääräsäätöjä, erillisohjauksia ja erilaisia hälytyspisteitä.

Korkeakoulurakennuksen käyttöä on kuvattu vuonna 2012 laaditussa kohteen energia-katselmusraportissa seuraavasti (Pihlajanmaa & Linne, 2012):

- monimuotoista opiskelua arkisin klo 7:30 – 20:00
- ajoittaista käyttöä lauantaisin klo 8:00 – 18:00
- satunnaiskäyttöä sunnuntaisin

H-rakennuksen luokka- ja ryhmätilojen ilmanvaihtoa ohjataan olosuhdeperusteisesti. Olosuhteiden hiilidioksidipitoisuuden asetuksena on näissä tiloissa 750 ppm. Sääto siis pyrkii pitämään ilmamääräsäätimien avulla huoneen hiilidioksidipitoisuudet asetusar-

vossaan. Kuvassa 19 on esitetty kaikkien olosuhdesäätöisten tilojen hiilidioksidipitoisuuksien käyttäytyminen yhden viikon ajalta yhden tunnin liukuvan keskiarvon avulla. Tätä hiilidioksidipitoisuuksien käyttäytymistä voidaan pitää vertailuna pudotusohjauksen aikaisiin olosuhteiden käyttäytymiseen. Kuten kuvasta voidaan todeta, olosuhteet tiloissa ovat pysyneet keskimäärin asetusarvon lähetyvillä. Muutamissa tiloissa hiilidioksidipitoisuudet ovat nousseet normaalitilanteessakin hetkellisesti yli 900 ppm:n, vaikka tarkastelujaksolla ei ole tehty muutoksia ilmanvaihdon normaaliin toimintaan.



Kuva 19. Hiilidioksidipitoisuuksien käyttäytyminen H-rakennuksessa viikon 51 ajalta.

Hetkittäiset hiilidioksidipitoisuuksien kasvu voi johtua esimerkiksi virheellisistä säätöparametreista ilmamääräsäädöissä tai hiilidioksidipitoisuusmittausten välittömässä läheisyydessä olevista ihmisistä. Pitoisuuksien käyttäytyminen normaalin käyttöajan aikana tulee ottaa huomioon pudotusohjauksen olosuhdevaikutusten tuloksia tarkasteltaessa. Opetustilojen käyttöasteet vertailuviikon ajalta on esitetty taulukossa 8. Käyttöaste-prosentit on laskettu tilojen läsnäolotietojen perusteella.

Taulukko 8. Tilojen käyttöasteet seurantaviikon ajalta.

Viikonpäivä	Kellonaika	Käyttöaste
ma	8 – 18	35 %
ti	8 – 18	40 %
ti	12 – 15	45 %
ke	8 – 18	30 %
to	8 – 18	20 %
pe	8 – 18	20 %

Yleisvalaistuksen soveltuvuutta kysynnänjoustossa on tutkittu laajalti etenkin Pohjois-Amerikassa. ”National Research Council Canada” on julkaissut useita tutkimuksia muun muassa siitä, kuinka käyttäjät ovat kokeneet hetkelliset valaistusmuutokset sekä

kenttätutkimuksia valaistuksen soveltuvuudesta kysynnän joustossa. Laboratorio- ja kenttätutkimusten perusteella on määritelty suositusarvoja, kuinka valaistusta voitaisiin hyödyntää kysynnän joustossa. Suositellut raja-arvot on kuvattu raportissa seuraavasti: (Newsham & Birt, 2010)

- Taso 1:
 - Nopea vaste, 10 sekunnin viiveellä
 - 20 % kun ei päivänvaloa
 - 40 % kun vähän päivänvaloa
 - 60 % kun paljon päivänvaloa
 - Hidas vaste, 30 minuutin tai pidemmällä viiveellä
 - 30 % kun ei päivänvaloa
 - 60 % kun paljon päivänvaloa
- Taso 2:
 - Nopea vaste, 10 sekunnin viiveellä
 - 40 % kun ei päivänvaloa tai vähän päivänvaloa
 - 80 % kun paljon päivänvaloa
 - Hidas vaste, 30 minuutin tai pidemmällä viiveellä
 - 50 % kun ei päivänvaloa
 - 80 % kun paljon päivänvaloa

Ensimmäinen tason mukaiset pudotukset on raportin mukaan toteutettavissa ilman että valtaosa käyttäjistä edes huomaisi muutosta. Toisen tason raja-arvot ovat suosituksia tilanteeseen, jossa vaaditaan kysynnän jouston kannalta enemmän joustopotentialia esimerkiksi verkon kriittisessä tilanteessa. Huomattavaa suosituksissa on, etteivät kyseiset raja-arvot sulje pois standardien vaatimuksia tilojen valaistustasosta. (Newsham & Birt, 2010) Pudotustasot ovat tarkoitettu edellä kuvatuissa suosituksissa kiinteästä valaistustasosta, valaistusjärjestelmä ei esimerkiksi ota itsessään huomioon päivänvalon määrää tai muutosta.

Raportissa kuitenkin huomautetaan, että valaistus soveltuu vain lyhytaikaisiin ohjauksiin esimerkiksi verkon häiriötilanteiden estämiseksi (Newsham & Birt, 2010). Täten valaistusta ei voida pitää suositeltavana sähkökuormana käyttöreserviksi kysynnän joustoon, jossa pudotusohjauksia on tiedossa useita kertoja päivässä. Vaikka tasojen pudottaminen onkin mahdollista ilman, että käyttäjät tätä huomaisivat, ei standardin mukaisista valaistustasosta ole syytä luopua.

5.2 Ilmanvaihtojärjestelmän kenttäkokeiden tulokset

H-rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä on toteutettu viiden eri ilmanvaihtokoneen avulla. Taulukossa 9 on esitetty ilmanvaihtokoneiden palvelualueet, käyttöajat sekä käyttöajan ja käyttöajan ulkopuolisen ajan ilmamäärät. Kaikki ilmanvaihtokoneet ovat taajuusmuuttajaohjattuja ja toimivat aikaohjelmien mukaisesti käyttöaikana mitoitusilma-

määrällä ja käyttöajan ulkopuolella osailmamäärällä. Luokka- ja ryhmätyötiloissa on toteutettu tilakohtainen tarpeenmukainen ilmanvaihto ilmamääräsäätimillä ja olosuhde-mittauksilla. Luokkahuoneita palvelevien ilmanvaihtokoneiden ilmamäärät vaihtelevat tilakohtaisten ilmamääräsäätimien käyttötilanteesta riippuen. Osailmamäärät on kysei- sessä kohteessa asetettu vastaamaan noin 40 – 50 % kokonaisilmamäärästä.

Taulukko 9. H-rakennuksen ilmanvaihtokoneiden käyttöajat ja ilmamäärät.

Kone	Palvelualue	Ohjaus	Säätötapa	Päiväaika		Päiväaika		Muu aika	
				Päiväaika		Ilmamäärä, m ³ /s		Ilmamäärä, m ³ /s	
				ma-pe	la	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto
TK62	aulat/käytävät	Taajuusmuuttajat	Kanavapaine	6-18:30	6-16	3,2	3,5	1,3	1,6
TK63	WC:t/aulat	Taajuusmuuttajat	Kanavapaine	7-17:30	6-16	2,2	2,5	1,0	1,3
TK64	luokat 1	Taajuusmuuttajat	Kanavapaine	6-18:30	6-16	2,9-3,4 *)	3,3-3,8 *)	1,4	1,5
TK65	luokat 2	Taajuusmuuttajat	Kanavapaine	6-18:30	6-16	2,9-3,4 *)	3,5-3,9 *)	1,4	1,5
TK66	toimistot	Taajuusmuuttajat	Kanavapaine	6-18:30	6-16	2,2	2,3	1,0	1,3

*) riippuu ryhmä-/luokkatilojen ilmamääräsäätimien asennosta

Kenttäkokeet toteutettiin kolmiosaisesti. Ensimmäisessä koetilanteessa kaikki ilmanvaihtokoneet pysäytettiin 15 minuutin ajaksi. Tämä osoittautui haasteelliseksi luokkatilojen ilmanlaadun osalta. Toisessa koetilanteessa ilmanvaihtokoneiden käyntiä pudotettiin osailmamäärälle 15 minuutin ajaksi, joka mittaustulosten perusteella on mahdollista toteuttaa ilman merkittävää olosuhteiden heikkenemistä. Kolmannessa osiossa testattiin ohjelmamuutoksella, kuinka nopeasti tehopudotus on mahdollista toteuttaa normaalitilanteen säätötapaan verrattuna.

5.2.1 Vaikutukset olosuhteisiin

Pudotusohjausten vaikutusta olosuhteisiin luokkatilojen osalta arvioitiin automaatiojärjestelmään liitettyjen hiilidioksidimittauksien perusteella. Kaikissa luokka- ja ryhmätyötiloissa, joissa on toteutettuna tarpeenmukainen ilmanvaihto, on asennettuna oven lähettyville noin 1,5 metrin korkeuteen hiilidioksidipitoisuusanturi. Lisäksi työtilojen osalta hiilidioksidipitoisuuksia seurattiin erillisen ilmanlaatumittarin avulla satunnaisesti muutamien tilojen osalta.

Lähtökohtina sisäilman laadun vertailuun pidettiin Sisäilmastoluokitus 2012:sta määrittelemiä sisäilmastoluokituksia. Normaalitilanteessa tarkasteltavan kohteen tilojen ilmamääräsäätö pyrkii pitämään tilan hiilidioksidipitoisuuden asetusarvossa 750 ppm, mikä vastaa sisäilmastoluokituksen laatuluokkaa S1, erinomainen sisäilmasto (Rakennustieto Oy, 2012).

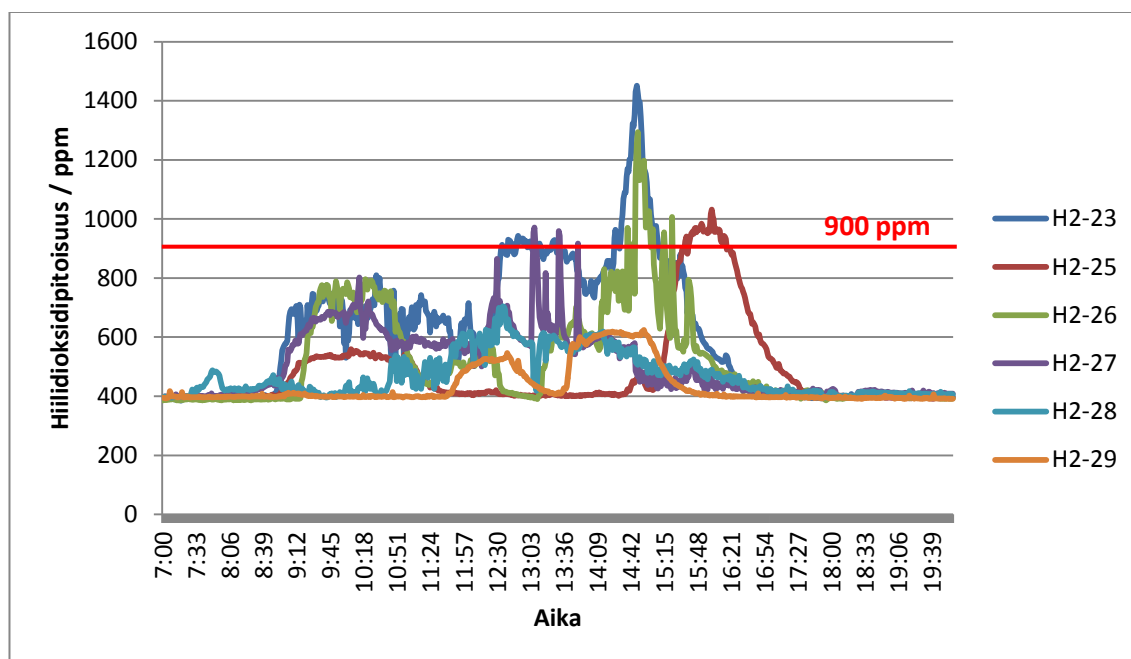
Kysynnän jouston ohjausten reunaehdoiksi kyseisiin tiloihin pidettiin tässä työssä sisäilmastoluokitusta S2, hyvä sisäilmasto. Tällöin S2 luokan ilman laadun tavoitearvot toimi- ja opetustiloille on, että tilojen hiilidioksidipitoisuus tulee olla alle 900 ppm:ää ja olosuhteiden pysyvyys on 90 % käyttöajasta (Rakennustieto Oy, 2012).

Luokituksen mukaan olosuhteiden pysyvyyttä tulee tarkastella hiilidioksidipitoisuuden yhden tunnin liukuvan keskiarvon perusteella (Rakennustieto Oy, 2012). Tästä syystä kenttäkokeiden mittaustuloksista muodostettiin kuvaajat lisäksi hiilidioksidipitoisuuksiin yhden tunnin liukuvista keskiarvoista.

Ilmanvaihdon pysäyttäminen

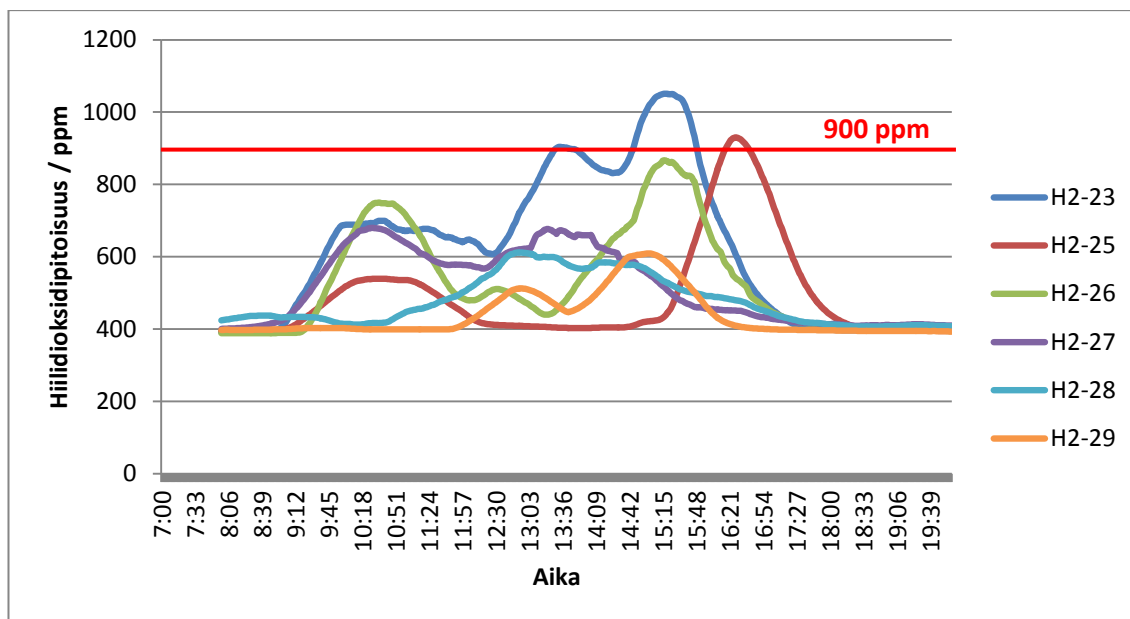
Ensimmäisen testijakson aikana ilmanvaihto pysäytettiin kokonaan. Testijakso toteutettiin 1.12.2014 arki-iltapäivänä klo 14:30 – 14:45, jolloin tilojen käyttöasteen todettiin olevan varauskalenterin tietojen perusteella suurimmillaan. Olosuhdesäästöisten tilojen läsnäolotietojen perusteella luokka- ja ryhmätyötilojen käyttöasteprosentti oli testijakson aikana noin 66 %. Tilojen kuormitusasteesta ei ole testijaksolta tarkempaa tietoa.

Ilmanvaihdon pysäyttäminen oli huomattavissa hiilidioksidipitoisuuksien kasvuna. Muutamissa tiloissa pitoisuudet kasvoivat hetkellisesti jopa yli sisäilmastoluokituksen mukaisen huonon sisäilman rajan 1200 ppm. Useissa tiloissa ylitettiin hetkellisesti 900 ppm:n raja. Kuvassa 20 on esitetty 2. kerroksen hiilidioksidipitoisuudet 10 sekunnin mittaustaajuudella. Kyseisessä kerroksessa ilmanvaihdon pysäyttäminen vaikutti tilojen olosuhteisiin kaikkein voimakkaimmin.



Kuva 20. Mitatut hiilidioksidipitoisuudet 2. kerroksen osalta 10 sekunnin mittaustaajuudella 1.12.2014.

Kuitenkin hiilidioksidipitoisuuksien yhden tunnin liukuvat keskiarvot pysyivät tarkastelujakson aikana kolmea tilaa lukuun ottamatta alle tavoiterajan 900 ppm. Läsnäolotietoon perustuen kyseisistä tiloista vain toisessa ylitettiin sisäilmastoluokituksen pysyvyysasteen raja, joka luokassa S2 on 90 % käyttöajasta. Kuvassa 21 on esitetty 2. kerroksen hiilidioksidipitoisuudet yhden tunnin liukuvalla keskiarvolla.



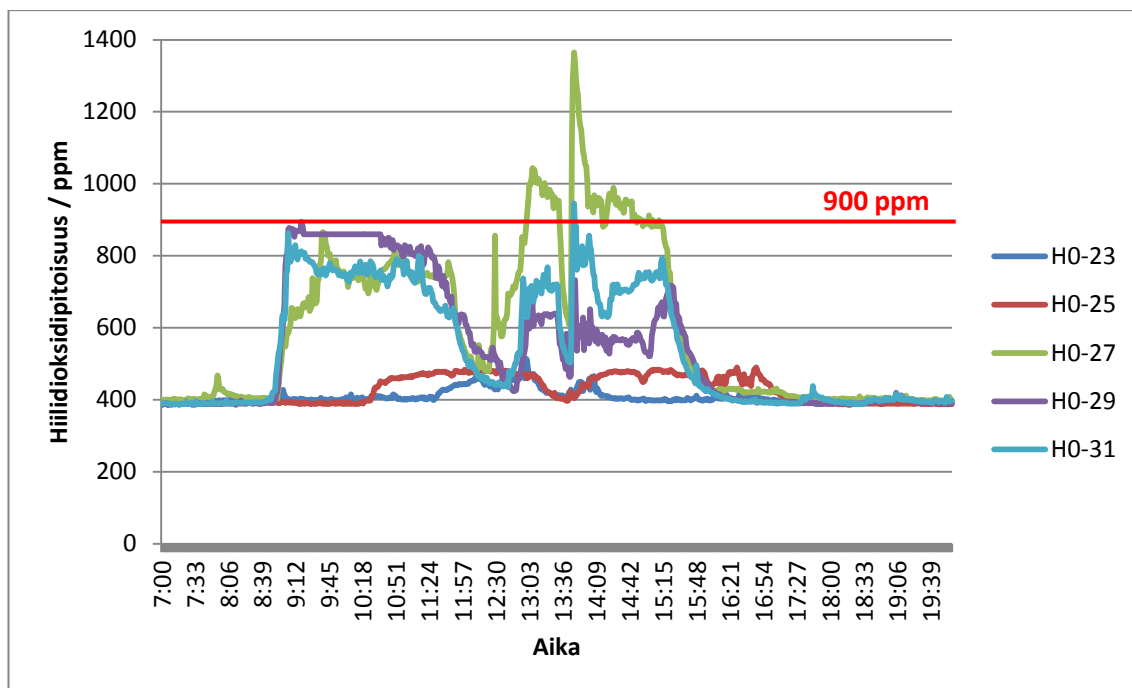
Kuva 21. Hiilidioksidipitoisuuksien yhden tunnin liukuva keskiarvo 2. kerroksen osalta 1.12.2014.

Liitteestä A löytyy kerroskohtaisesti kaikkien tilojen hiilidioksidipitoisuudet testipäivänä 10 sekunnin mittaustajaudella. Lisäksi liitteestä löytyy vastaavasti kerroskohtaisesti yhden tunnin liukuvat keskiarvot testipäivän osalta.

Ilmanvaihdon pudottaminen osailmamäärälle

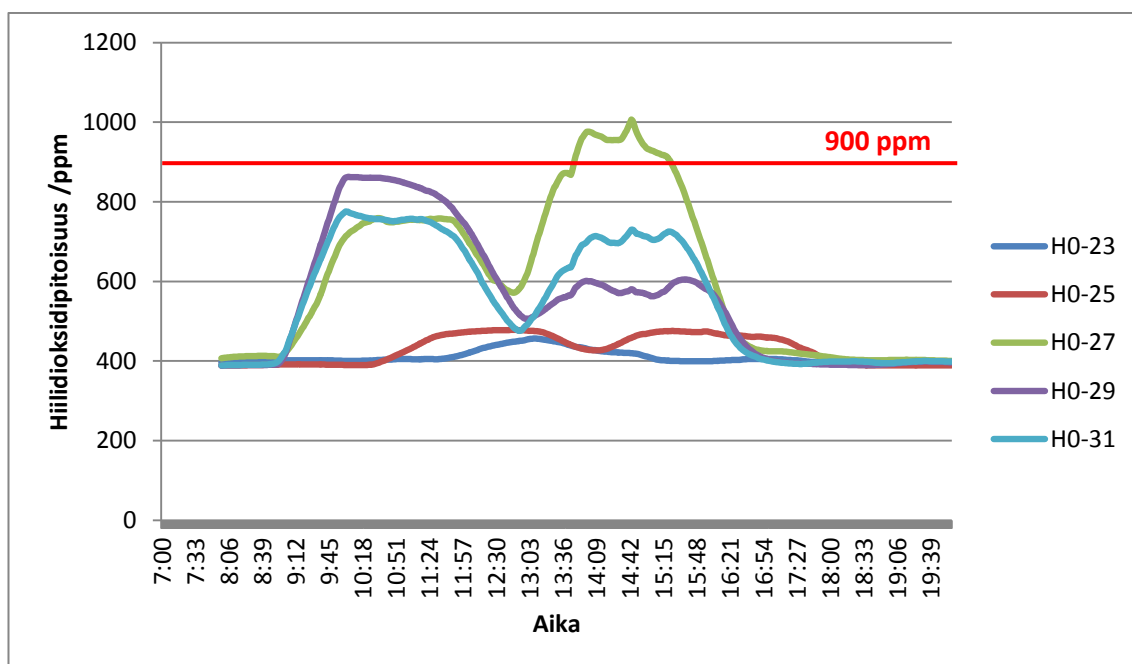
Toisen testijakson aikana ilmanvaihdon ilmamäärät pudotettiin vastaamaan noin 40 – 50 % normaalin käyttöajan ilmamäärästä. Testijakso toteutettiin 2.12.2014 arki-iltapäivänä klo 13:30 – 13:45, jolloin tilojen käyttöasteen todettiin olevan varauskalenterin tietojen perusteella normaaliin viikon käyttöasteeseen verrattuna suurimmillaan. Olosuhdesäästöisten tilojen läsnäolotietojen perusteella luokka- ja ryhmätyötilojen käyttöaste prosentti oli testijakson aikana noin 57 %.

Tilojen ilmanlaatu pysyi huomattavasti paremmin hallinnassa verrattuna ilmanvaihdon pysäyttämiseen kokonaan. Vain muutamien tilojen osalta oli havaittavissa hiilidioksidipitoisuuksien kasvua testijakson aikana. Kuvassa 22 on esitetty 0-kerroksen hiilidioksidipitoisuuksien käyttäytyminen, jossa ohjauksen vaikutus on nähtävissä voimakkaimmin.



Kuva 22. Mitatut hiilidioksidipitoisuudet 0 -kerroksen osalta 10 sekunnin mittaustaajuudella 2.12.2014.

Hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvoista vain yhden tilan tunnin keskiarvo ylitti 900 ppm:n rajan. Ylityksen kesto ylitti myös sisäilmastoluokituksen pysyvyyssvaatimuksen 90 % käyttöajasta. Kyseistä tilaa lukuun ottamatta kaikissa muissa tiloissa sisäilman laatu pysyi kyseisen päivän aikana laatuluokan S2 rajoissa. Kuvassa 23 on esitetty 0-kerroksen yhden tunnin liukuva keskiarvo tilojen hiilidioksidipitoisuuksista.



Kuva 23. Hiilidioksidipitoisuuksien yhden tunnin liukuva keskiarvo 0-kerroksen osalta 2.12.2014.

Liitteestä B löytyy kerroskohtaisesti kaikkien tilojen hiilidioksidipitoisuudet testipäivänä 10 sekunnin mittaustaaajuudella. Lisäksi liitteestä löytyy vastaavasti kerroskohtaisesti yhden tunnin liukuvat keskiarvot testipäivän osalta.

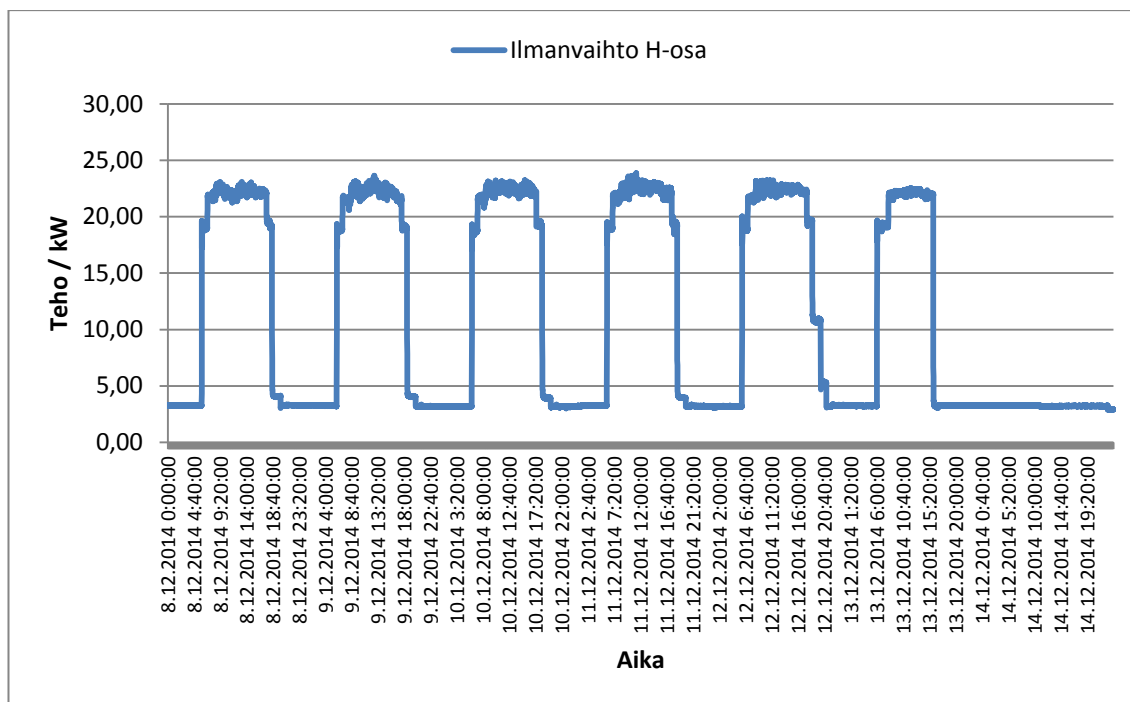
5.2.2 Potentiaallinen tehokuorma kysynnän joustoon

Olosuhdevaikutuksien perusteella voidaan todeta, että ilmamäärän pudottaminen osailmamäärälle olisi mahdollista toteuttaa ainakin lyhytaikaisesti myös opetustilojen osalta. Ilmamäärän pudottaminen puolelle ilmamäärälle mahdollistaa jo noin 75 % tehon pudotuksen. Taulukossa 10 on esitetty todetut käyttöajan ja käyttöajan ulkopuoliset tehoarvot.

Taulukko 10. Ilmanvaihtokoneiden sähkötehot eri käyttötilanteissa.

Kone	Puhaltimen nimellisteho		Käyttöajan toteutunut teho		Käyttöajan ulkopuolinen teho	
	Tulo, kW	Poisto, kW	Tulo	Poisto	Tulo	Poisto
TK62	5,5	5,5	5,4	1,8	0,5	0,4
TK63	2,2	2,2	1,8	1,4	0,3	0,3
TK64	5,5	5,5	1,9-2,6	1,9-2,6	0,3	0,3
TK65	5,5	5,5	1,9-2,2	2,1-2,7	0,3	0,3
TK66	3,0	3,0	1,3	1,3	0,3	0,3
			Yhteensä noin 21-23 kW		Yhteensä noin 3 kW	

Koko rakennusosan kuuden ilmanvaihtokoneen pudottaminen osailmamäärälle mahdollistaisi 18 – 20 kW joustopotentialin kysynnän joustoon. Joustopotentiali olisi käytettävissä käyttöajan puitteissa arkisin maanantaista lauantaihin. Vastaavasti ilmanvaihtoa voitaisiin hyödyntää vastaavan tehopotentiaalın verran käyttöajan ulkopuolella tehon kasvattamiseen hetkellisesti. Kuvassa 24 on esitetty ilmanvaihdon tehon käyttäytyminen yhden viikon ajalta. Kuten kuvaajasta voidaan todeta, ilmanvaihdon käyttäytyminen on helppo ennustaa. Tällöin on myös mahdollista määritellä ilmanvaihdon ohjauspotentiali vuorokauden ajan ja viikonpäivän mukaan.



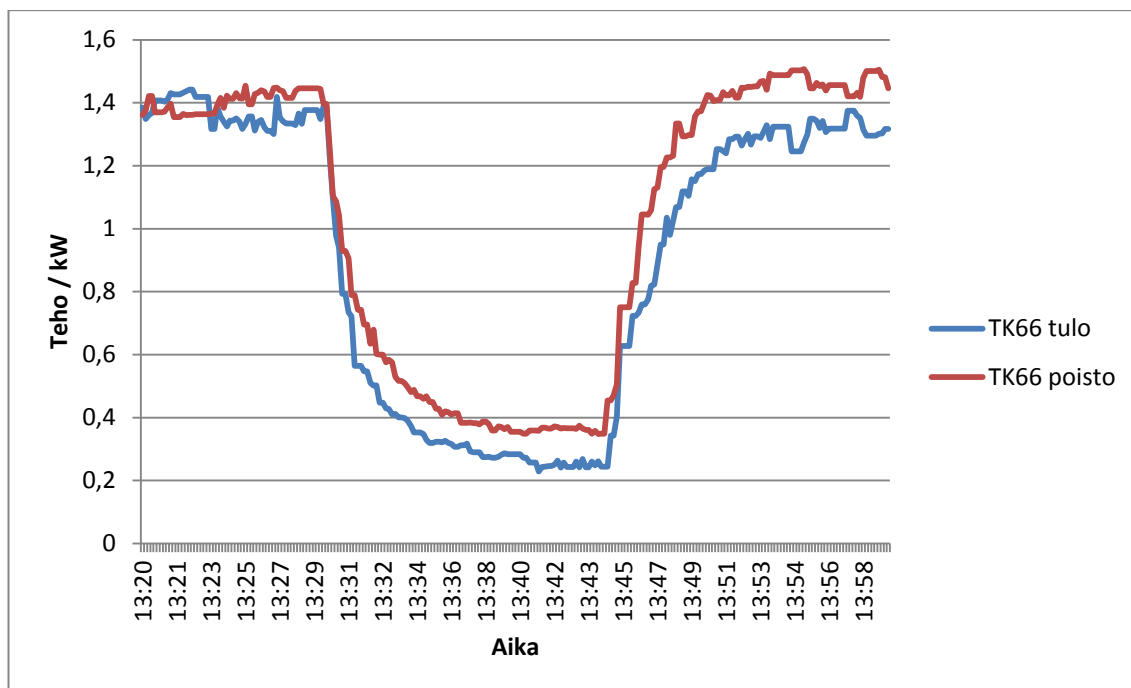
Kuva 24. H-rakennuksen ilmanvaihdon käyttäytyminen viikon 50 ajalta.

5.2.3 Ilmanvaihtokoneen säädön toteuttaminen kysynnän jouston kannalta

Tietyissä kysynnän jouston ohjauksissa, kuten kuormien ohjaaminen sähkövoimajärjestelmän häiriöreservinä, on oleellista kuorman ja kuormatehon nopea pudottaminen. Lähtökohtaisesti taloteknisiä järjestelmiä ei ole suunniteltu esimerkiksi tehon nopean pudottamisen näkökulmasta. Ilmanvaihtokoneiden käynnin pudottamisen nopeuteen vaikuttavat muun muassa ohjauksen ja säädön toteutustavat.

Puhaltimia ohjaaville taajuusmuuttajille on yleisesti aseteltuna ramppiviiveet, joiden rajoittamana puhaltimien käynnistys ja pysähtyminen tapahtuu hallitusti. Tyypillisesti käynnistysramppi on syytä olla pysäytysramppia pidempi, jolloin esimerkiksi sulkupeilit ehtivät avautua koneen käynnistyessä. Pysäyttämislamppi voi olla lyhyempi, mutta kuitenkin riittävän pitkä, ettei esimerkiksi taajuusmuuttaja alkaisi syöttämään tehoa sähköverkkoon päin.

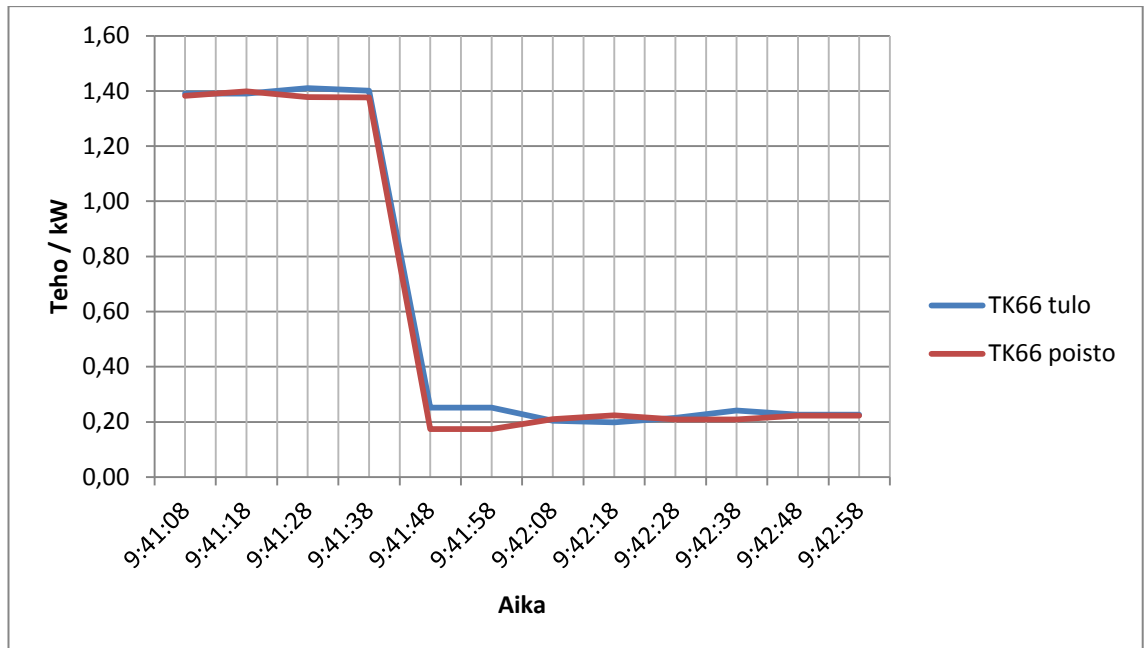
Ilmanvaihtokoneiden nopeutta ohjataan yleensä aikaohjelmilla käyttötarkoituksen ja käyttöaikojen mukaisesti. Kanavapaine- ja ilmamääräsäätöisillä ilmanvaihtokoneilla tämä tarkoittaa asetuksen pudottamista tai korottamista, jolloin säätö muuttaa puhaltimien nopeutta, kunnes säätö tavoittaa uuden asetusarvon. Tämä on tyypillisesti viritetty toimivan säädön saamiseksi melko hitaaksi. Kuvassa 25 on esitetty yhden ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistopuhaltimen tehon käyttäytyminen, kun kone ohjataan pienemmälle kanavapaineasetukselle. Kanavapaineasetuksen muutoksella tehon pudotus toteutui noin 50 % noin 1 – 2 minuutissa ja 100 %:iin vasta noin 10 minuutissa.



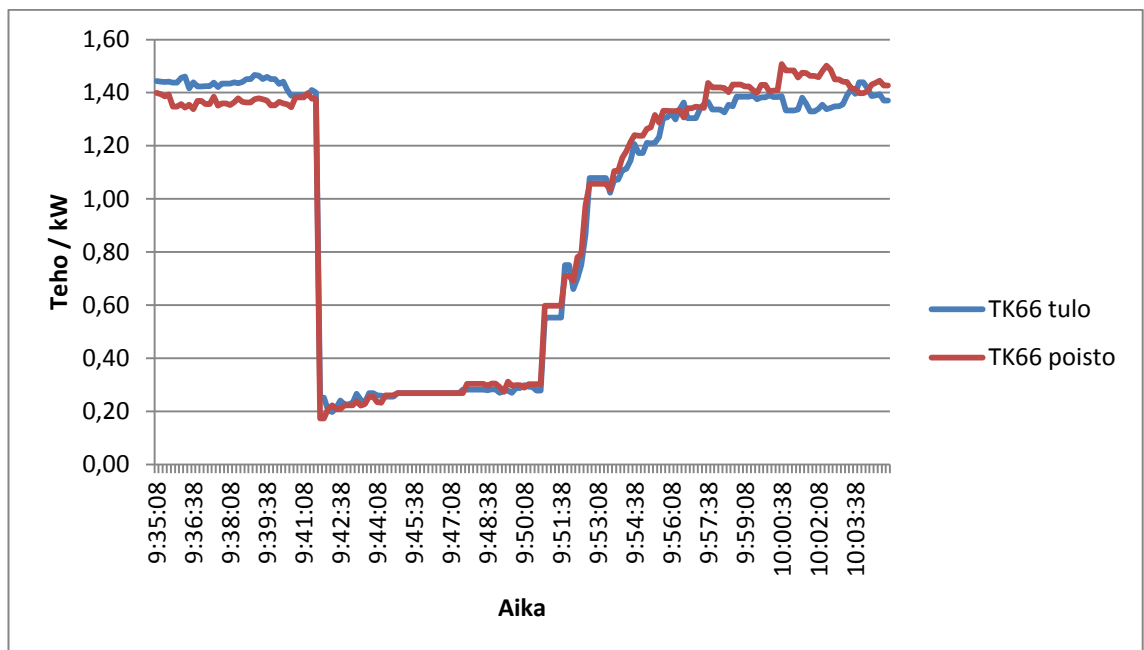
Kuva 25. Tuloilmakoneen TK66 tehon käyttäytyminen kanavapainesäädön ohjaamana.

Ilmanvaihtokoneen mahdollisimman nopeaa pudottamista osateholle selvitettiin yhden ilmanvaihtokoneen osalta. Automaatio-ohjelmaan toteutettiin muutos, jolla voitiin ohittaa normaali kanavapainesäätö halutuksi ajaksi. Muutoksena automaatio-ohjelman kanavapainesäätimeen tehtiin toiminto, jossa ulkoisella käskyllä koneen käyntiasetus pudotettiin osailmamäärälle. Kysynnän jousto käskyn toimiessa kanavapainesäätimen sen hetkinen tila pudotettiin puoleen aseteltavaksi ajaksi. Tämän jälkeen säätö palautui normaaliin osailmamäärän toimintoon.

Edellä mainitun ohjelmamuutoksen avulla ilmanvaihtokoneen käynnin pudottaminen saatiin toteutettua taajuusmuuttajan ramppihitaiden nopeudella. Tehon pudotus normaalin ilmamääräasetuksen käyntitehosta osailmamäärän käyntitehoon kesti alle 10 sekuntia. Kuvassa 26 on kuvaaja tehon käyttäytymisestä testijakson ajalta 10 sekunnin mittaustaajuudella. Kuvassa 27 on esitetty tehon käyttäytyminen koko testijakson ajalta.



Kuva 26. Tuloilmakoneen TK66 tehon käyttäytyminen painesäätömuutoksen jälkeen lyhyellä tarkastelujaksolla.



Kuva 27. Tuloilmakoneen TK66 tehon käyttäytyminen painesäätömuutoksen jälkeen pidemmällä tarkastelujaksolla.

5.3 Yleisvalaistusjärjestelmän kenttäkokeiden tulokset

Tampereen ammattikorkeakoulun tiloista kahdessa rakennusosassa, uudisrakennus G-talo ja peruskorjattu H-talo, valaistus on toteutettu Helvar Oy Ab:n reititinpohjaisella DALI-valaistusohjausjärjestelmällä. Koejärjestelyiden yhteydessä järjestelmän ohjel-

mointia muutettiin siten, että ulkoisella ohjauksella oli mahdollista pudottaa säädettävää valaistusta yhden kerroksen osalta. Ohjauskäsky liitettiin valaistusjärjestelmään olemassa olevasta kiinteistöautomaatiojärjestelmästä releohjauksina.

Yleisvalaistuksen soveltuvuutta kysynnän joustoon ja valaistustason pudottamisen olosuhdevaikutuksia arvioitiin oppilaille suoritetun kyselyn perusteella sekä tilojen valaistusvoimakkuustasoja mittaamalla. Kysely suoritettiin samaan aikaan kahdelle ryhmälle kahdessa eri luokkatilassa. Luokkatilat olivat taloteknisiltä järjestelmiltään ja toiminoiltaan sekä kooltaan vastaavanlaiset. Vertailuryhmän osalta tilan valaistuksessa ei toteutettu lainkaan muutoksia normaaliin valaistukseen. Toisen koeryhmän osalta olosuhdevaikutuksia testattiin toteuttamalla kahden oppitunnin aikana kaksi 15 minuutin pituista valaistustason pudottamista, jolloin valaistusvoimakkuutta pudotettiin sen hetkisestä tilanteesta 30 %. Koe suoritettiin molemmille ryhmille kello 10 ja 12 välisenä aikana. Kyselyssä esitettiin 5 lyhyttä kysymystä liittyen siihen, kuinka oppilaat ovat kokeneet valaistuksen oppitunnin ajalla ja ovatko he huomanneet valaistuksessa muutoksia oppitunnin aikana. Kyselyssä sovellettiin Likert-asteikkoa. Liitteestä C löytyy oppilaille pidetty kysely kokonaisuudessaan.

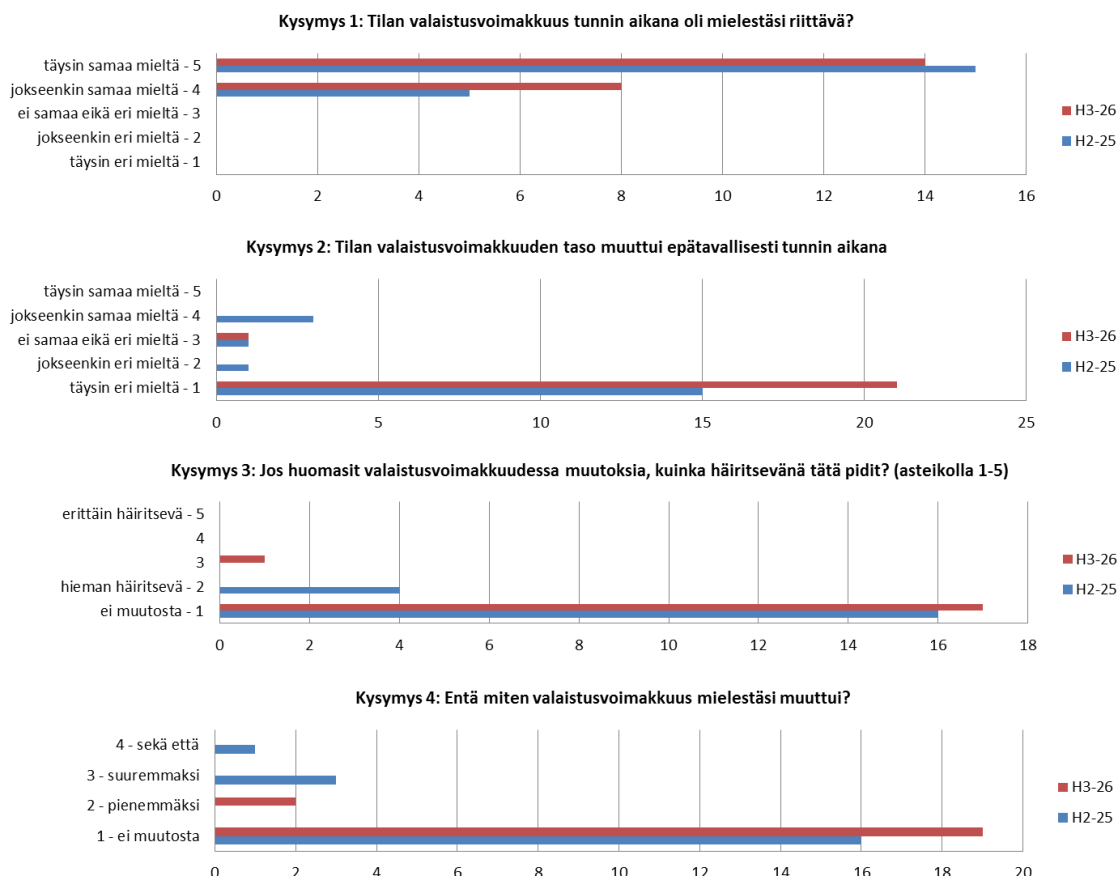
Säädettävää valaistusta koko H-rakennuksessa on noin 3100 m² alalla. Näiden tilojen valaistusta voitaisiin hyödyntää kysynnän joustossa pelkän ohjelmamuutoksen avulla. Tiloja, joissa valaistusta ohjataan vain releohjauksilla, on noin 1100 m² alalla. Näihin kuuluu muun muassa käytävävalaistukset. Tilojen osalta, joissa on säädettävä valaistusta, on toteutettu vakiovalosäätö, joka ottaa huomioon saatavilla olevan luonnonvalon määrän. Lisäksi luokka- ja ryhmätyötiloissa on toteutettu erilaisia tilannevalaistuksia esimerkiksi videotykki käyttöön. Nämä vaikuttavat kulloinkin valaistuksen käyttämään sähkötehoon.

5.3.1 Vaikutukset olosuhteisiin

Vastauksien perusteella vertailuryhmästä noin 60 % oli täysin samaa mieltä valaistuksen riittävydestä ja loput 40 % jokseenkin samaa mieltä. Vastaavasti koeryhmästä 75 % piti valaistusta riittävänä ja 25 % jokseenkin riittävänä.

Vertailuryhmästä yksi oli huomannut valaistustasossa muutoksia, vaikka muutoksia ei tilan valaistuksessa tehtykään. Koeryhmästä 25 % oli huomannut valaistustasoissa joi-tain muutoksia. Tätä ei kuitenkaan pidetty kuin hieman häiritsevä. Vain yksi vastanneista oli huomannut valaistuksen muuttuvan sekä pienemmäksi että suuremmaksi. Loput vastanneista olivat huomanneet vain valaistustason muutoksen palautustilanteessa suuremmaksi. Vastauksista voidaan myös päätellä, että muutosten ajankohdat olivat arviolta juuri niinä hetkinä, kun valaistusta muutettiin. Käyttäjien arviot muutosten ajankohdasta täsmäsivät toteutettujen ohjausten ajankohtiin.

Yhteenvedona kyselyn tuloksista voidaan päätellä, ettei valaistukseen tehtyjä ulkopuolisia muutoksia pidetty häiritsevinä. Todennäköisesti oppilaat eivät olisi edes huomanneet muutoksia, mikäli valaistuksen palauttaminen normaaliin käyttötilanteeseen olisi toteutettu ohjelmallisesti paremmin. Valaistusvoimakkuus palautui alkuperäistä tilannetta korkeammaksi. Lisäksi muutosnopeus alkuperäiseen tilanteeseen olisi voitu toteuttaa pidemmällä ramppiajalla. Kuvassa 28 on yhteenveto kyselyn vastauksista.



Kuva 28. Koonti kyselyiden vastauksista (H3-26 vertailuryhmä ja H2-25 koeryhmä).

Valaistuksenohjausjärjestelmään ohjelmoitiin kaksi eri pudotustasoa, 15 % ja 30 % pudotukset. Valaistustasot luokka- ja ryhmätiloissa laskivat 15 %:n pudotuksella keskimäärin noin 40 – 50 luxia ja 30 % pudotuksella 140 – 170 luxia. Taulukossa 11 on esitetty mitatut valaistustasot kolmesta eri opetustilasta.

Taulukko 11. Valaistustasojen muutokset 15 %:n ja 30 %:n pudotuksilla.

pvm	kello	tila	NORM	15 %	ero	30 %	ero
3.12	18:30	H2-26	740	700	40	590	150
3.12	18:30	H2-25	735	685	50	577	158
3.12	18:30	H2-23	755	710	45	600	155

15 %:n ohjausmuutoksella aikaansaatiin keskimäärin noin 5 – 10 % (40 – 50 luxin) muutos mitattuun valaistusvoimakkuuteen. 30 %:n ohjausmuutoksella vastaavasti noin 20 % (150 – 160 luxin) muutos valaistusvoimakkuuteen. Valaistustasot luokkatiloissa olivat lähtötilanteeltaan hieman standardin määritelmää korkeammat, keskimäärin yli 700 luxia. Standardin mukaan vastaavien tilojen valaistusvoimakkuus tulisi olla vähintään 500 luxia.

Mittausten tuloksia voidaan verrata standardin SFS-EN 12464-1 taulukkoon valaistuserojen havaitsemisesta. Jotta valaistuserot ovat subjektiivisesti havaittavissa, suositellut valaistusvoimakkuuksien tasot (lukseina) ovat standardin EN 12655 mukaan: (SFS, 2010)

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 50 – 1000 – 1500 – 2000 – 3000

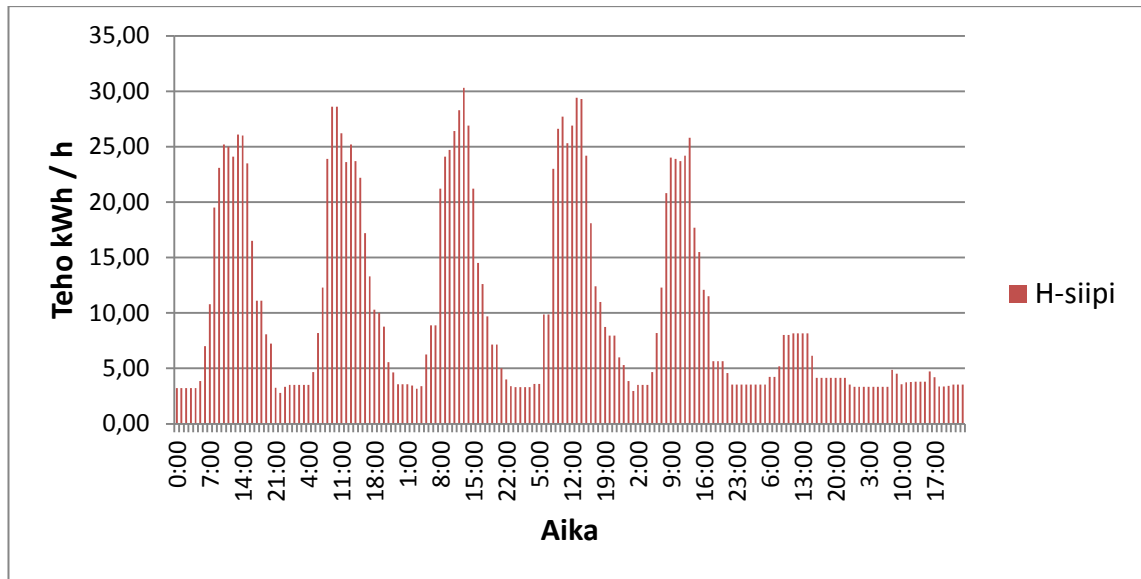
Lähtöarvoiltaan tilojen valaistustasot olivat noin 700 – 750 luxia. Suoritetussa testissä valaistusvoimakkuuksien tasot eivät pudonneet yli standardin mukaisen portaan, tässä tapauksessa alle 500 luxin. Tällöin voidaan myös olettaa, että 30 % ohjausviestin pudotaminen kyseisessä järjestelmässä olisi mahdollista toteuttaa huomaamattomasti ja ilman häiriötä käyttäjille. Tätä tukevat myös kyselystä saadut tulokset.

5.3.2 Potentiaali kysynnän joustoon

Yleisvalaistuksen ohjauspotentiaalia koko rakennusosan yleisvalaistuksessa voitiin arvioida yhteen kerrokseen suoritettujen kenttäkokeiden perusteella. Tarkasteltavan kerroksen valaistuksen kesimääräinen teho arkisin klo 8 – 16 välillä on noin 6 – 8 kW. Tästä on mahdollista vähentää noin 1,5 – 2,5 kW 30 % ohjauspudotuksella. Tämä tarkoittaa noin 25 – 30 % tehon pudotusta.

Koko H-rakennuksen yleisvalaistuksen kesimääräinen teho vaihtelee klo 8 – 16 välisenä aikana 20 – 30 kW välillä. Tästä arviolta noin 60 – 70 % on säädettävää valaistusta, loput käytävä- tai aulatilojen releohjattua valaistusta. Säädettävän valaistuksen osuus kokonaistehosta käyttöaikana on arviolta siis noin 12 – 21 kW. 30 % pudotuksella tästä on saatavissa arviolta noin 3 – 6 kW joustopotentiaalia kysynnän joustoon.

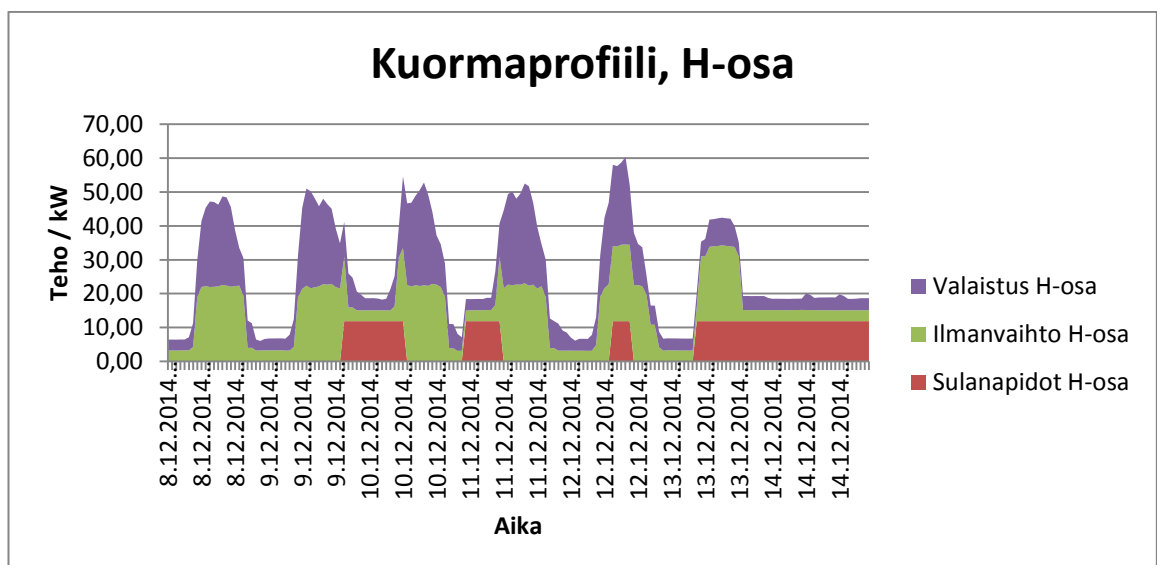
Kuvassa 29 on esitetty valaistuksen käyttäytyminen viikon ajalta H-talon osalta. H-talon valaistuksen kuluttama teho on noin 25 – 28 kW käyttöaikana klo 8 ja klo 16 välisenä aikana.



Kuva 29. Valaistuksen tehon käyttäytyminen viikon tarkastelujaksolla (viikko 47).

5.4 Tarkasteltujen sähkökuormien tehoprofiili normaalin käyttöjakson aikana

Kohteen sähkökuormien soveltuvuutta kysynnän joustoon arvioitiin myös mitattujen tehokulutusten perusteella. Järjestelmäkohtaisen tehomittauksen perusteella voitiin muodostaa todellinen kuormaprofiili järjestelmien kuluttamasta sähkötehosta. Kuvassa 30 on esitetty tarkasteltavan rakennusosan ilmanvaihdon, valaistuksen sekä ränni- ja kattokaivosulatusten tehoprofiili yhden viikon ajalta. Kun tiedetään, miten sähkökuormat tyypillisesti käyttäytyvät, voidaan myös kuormien ohjauspotentiaalia arvioida tarkemmin.



Kuva 30. Eri järjestelmien summattu tehokäyttäytyminen yhden viikon ajalta H-rakennuksessa.

Kohteen ilmanvaihtoa ohjataan pääsääntöisesti aikaohjelmien perusteella sekä luokkatilojen ilmamääriä ohjataan lisäksi olosuhdeperusteisesti. Yleisvalaistus ohjautuu joko läsnäolotietojen tai painikkeiden perusteella käyttöasteen mukaisesti. Lisäksi valaistustaso säätyy vakiovalosäädön mukaan päivänvalon määrän perusteella. Ränni- ja katto-kaivosulatukset ohjautuvat ulkolämpötilarajojen mukaan. Sähkön kulutus painottuu hyvin voimakkaasti päiväaikaan. Kohteen ilmanvaihtoa, yleisvalaistusta ja ränni- ja katto-kaivosulatuksia voitaisiin hyödyntää kysynnän joustossa seuraavasti.

Ilmanvaihto

- ilmanvaihto voitaisiin ohjata $\frac{1}{2}$ ilmamäärälle käyttöaikana ja vastaavasti hetkelisesti korottaa täydelle ilmamäärälle käyttöajan ulkopuolella
- H-talon IV-potentiaali arkisin klo 7 – 18 sekä lauantaisin klo 8 – 17 on noin 16 kW
- Tehostuspotentiaalia käyttöajan ulkopuolella on vastaavasti noin 16 kW

Valaistus

- ohjattavissa olevaa valaistusta voitaisiin pudottaa 15 – 30 minuutin ajaksi 30 % käyttötilanteen tasosta
- H-talon kuormanohjauspotentiaali arkisin klo 8 – 16 on noin 3 – 6 kW

Sulanapidot

- H-talon kattokaivojen ja rännien sulanapitojen ohjauspotentiaali on noin 11 kW
- sulanapitojen kuormaa voitaisiin käyttää pudottamalla kuormaa kun ohjaus päällä (ulkolämpötilan ollessa välillä $-5\text{ C} \dots +3\text{ C}$) tai tarvittaessa ohjata päälle esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa välillä $-8\dots-5$ tai $+3\dots+5$

6. CASE-KOHTEEN TULOSTEN TARKASTELU

Tarkasteltavan kohteen talotekniset järjestelmät edustavat tämän hetken energiatehokasta toteutusta. Tarpeenmukainen ilmanvaihdonohjaus opetustiloissa sekä läsnäolon ja luonnonvalon huomioiva yleisvalaistus ovat jo lähtökohtaisesti hyvin energiatehokkaita ja olosuhteet huomioivia ratkaisuja. Täten myös järjestelmien kuluttama sähköteho vaihtelee käytösateen mukaisesti, jolloin ohjauspotentiaalin ennustaminen ja määrittäminen on vaikeampaa. Tämä lisää entisestään kuormatyypikohtaisen reaaliaikaisen tehomittauksen tarvetta, jotta ensinnäkin tunnetaan sähkökuormien käyttäytyminen paremmin sekä voidaan tietää kysynnän jouston kannalta kulloinkin tarjolla olevan joustopotentiaalin suuruus.

Energiatehokkaat toteutukset myös vähentävät sähkökuormien joustopotentiaalia kysynnän jouston kannalta. On luonnollisesti suotavaa, että uudisrakennukset sekä järjestelmien saneeraukset, toteutetaan mahdollisimman energiatehokkaasti ja käyttötarpeita vastaaviksi. Olemassa oleva rakennuskanta sekä niiden talotekniset järjestelmät ja sähkökuormat omaavat kuitenkin merkittävää potentiaalia kysynnän jouston kannalta. Se, kuinka olemassa olevat järjestelmät, kuten kiinteistöautomaatiojärjestelmät, saadaan liitettyä esimerkiksi keskitetyn kysynnän jouston käyttöön, on haastavaa.

Kenttäkokeiden yhteydessä tehtyjen tarvittavien teknisten muutosten sekä testitulosten perusteella voitiin arvioida kiinteistökuormien soveltuvuutta kysynnän joustoon. Seuraavissa kappaleissa esitetään suosituksia taloteknisten järjestelmien toteutukseen sekä pohditaan ilmanvaihdon ja valaistuksen soveltuvuutta kysynnän joustoon.

6.1 Kiinteistöautomaatio ja talotekniset järjestelmät

Kysynnän jousto tuo uudenlaisia vaatimuksia taloteknisiin järjestelmiin. Ennen kaikkea ohjausten ja tiedonsiirron reaaliaikaisuus korostuu. Perinteiset talotekniset ratkaisut eivät välttämättä suoraan vastaa näitä vaatimuksia. Säädot toteutetaan yleensä prosessien kannalta riittävän rauhallisiksi tai vastaavasti mittautustietojen, kuten sähkömittausten, kerääminen on toteutettu usein vain energiankulutuksen näkökulmasta. Kysynnän jouston tarpeet tulisi määritellä niin kiinteistöjen sähköjärjestelmien kuin sähkökuormia ohjaavien automaatiojärjestelmien osalta. Tällöin esimerkiksi tarvittavat kuormaryhmitelyt tai toiminnallisuudet automaatio-ohjelmointiin voitaisiin ottaa jo rakennusvaiheessa huomioon.

Nykyaikainen kiinteistöautomaatiojärjestelmä olisi mahdollista toteuttaa siten, että perusedellytykset esimerkiksi kuormien ohjaamiselle, olosuhteiden mittaamiselle sekä

kuormien todentamiselle olisi toteutettuna. Kiinteistöautomaatiojärjestelmän kokonaisuutta kuvataan suunnitteluasiakirjoissa tyypillisesti järjestelmäkaaviolla (Piikkilä, 2012). Liitteessä D on esitetty muun muassa edellä kuvatut asiat huomioivan automaatiojärjestelmän järjestelmäkaavio. Kyseinen esitys vastaa nykyaikaista ja kysynnän jouston huomioivan kiinteistöautomaatiojärjestelmän rakennetta, jossa automaatio ja ohjelmallinen älykkyys ovat hajautettuna lähemmäksi prosesseja.

Integroidut ja hajautetut automaatiojärjestelmät mahdollistavat monipuolisemman kysynnän jouston toteuttamisen kiinteistöissä. Tilakohtaisilla säädöillä on mahdollista toteuttaa esimerkiksi tarpeenmukainen ilmanvaihto ja esimerkiksi tilakohtainen sisäilmanlaadun seuranta. Väyläpohjaiset mittarit mahdollistavat reaaliaikaisen tehomittauksen ja tätä kautta ohjattavien kuormien todentamisen. Hajautettu ja integroitu automaatio mahdollistaa lisäksi monipuolisemman sähkökuormien ohjaamisen kiinteistöissä. Esimerkiksi ryhmäkeskustasolle hajautettu automaatio luo edellytykset tarkempaan ryhmäkohtaiseen ohjaamiseen taloudellisesti. Järjestelmien integraatiolla voidaan liittää muun muassa mahdolliset valaistushajautusjärjestelmät kustannustehokkaasti kiinteistöautomaatioon.

Ryhmäkeskusohjattujen sähkökuormien ohjaaminen kysynnän joustossa edellyttää normaalia toteutusta ryhmäkohtaisempaa kuormien ohjausta. Kuormat tulisi ryhmitellä ohjauspotentiaalin mukaisesti. Ryhmäkeskustasolle hajautetun automaation avulla on mahdollista toteuttaa ryhmäkohtaiset ohjaukset ilman valvonta-alakeskusten ja ryhmäkeskusten välistä ohjauskaapelointia. Automaatiolaitteet sijaitsevat ryhmäkeskusosassa ja liitäntä muuhun automaatioon tapahtuu joko väyläliityntänä tai esimerkiksi TCP/IP -yhteyden välityksellä. Ryhmäkeskusautomaatioon voidaan liittää myös sähkömittaukset. Tämä mahdollistaa edullisen kokonaisuuden toteuttamisen.

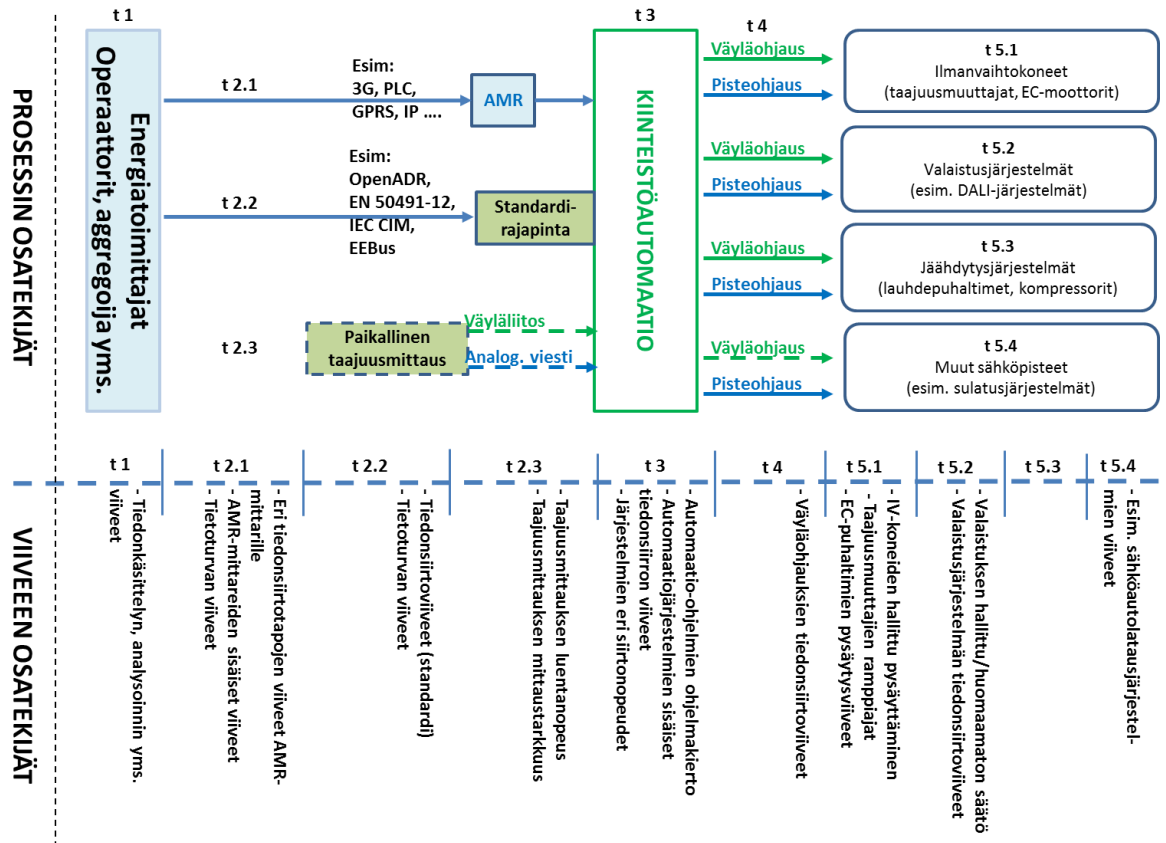
Oleellista on lisäksi huomioida, että mikäli automaatiojärjestelmän älykkyys on hajautettuna esimerkiksi ilmanvaihtokoneille tai jäähdytyskoneille, on kysynnän jouston toiminnallisuudet huomioitava laite- ja järjestelmäkohtaisessa ohjelmoinnissa.

Kotiautomaatiojärjestelmiä kysynnän hintajoustotarkoitukseen on jo markkinoilla, mutta tämän kaltaisten teknologioiden liittäminen tulevaisuudessa esimerkiksi keskitettyyn kysynnäjouston kokonaisuuteen voi olla mahdotonta. Lisäksi tällaisten laitteiden käyttöä voidaan olettaa olevan melko lyhyt, eikä standardoimattomia järjestelmiä tai laitteita voida useinkaan korvata toisella tuotteella. Valmistajien omia käytäntöjä kysynnän joustossa ei voida pitää hyvänä kehityskulkuna.

6.1.1 Taloteknisten järjestelmien ajallinen käyttäytyminen

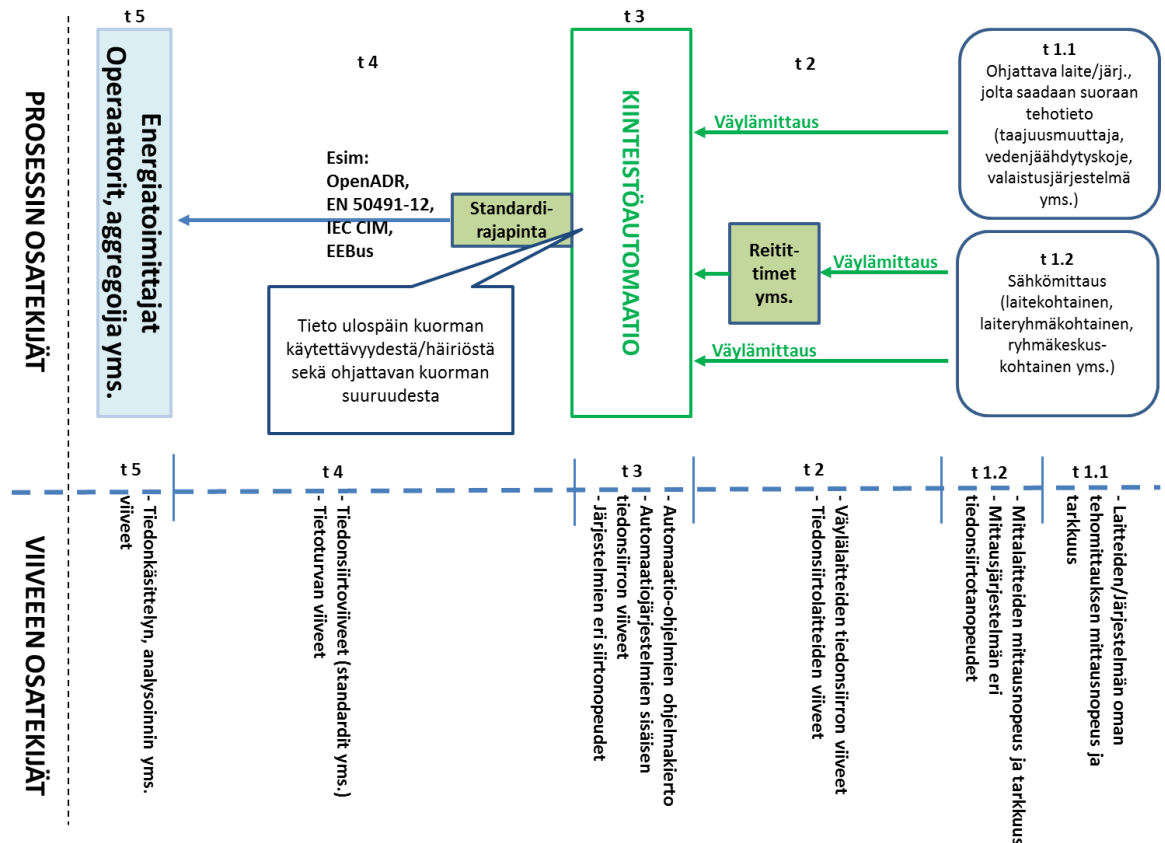
Reservikäytössä kiinteistökuormien ohjaamiselle on tarkat vaatimukset. Sähkökuormien osalta edellytyksenä on ennen kaikkea nopea vaste ohjaukselle. Tämä asettaa uusia haasteita sähkökuormien ohjaamiseksi. Taloteknisissä järjestelmissä on ohjaus ja säätö-

viiveitä, joita ei ole ajateltu tyypillisesti kysynnän jouston näkökulmasta. Jo pelkästään kiinteistön sisällä kuormanohjausketjussa voi olla useita eri liitäntärajapintoja. Tämä edellyttää esimerkiksi eri tiedonsiirtotapoja ja -protokollien integrointia. Täten ohjauskäskyn nopeuteen vaikuttavia tekijöitä voi olla lukuisia. Jotta voidaan ymmärtää mahdolliset ohjausviiveeseen vaikuttavat tekijät eri järjestelmien osalta, on tunnettava mitkä tekijät voivat viiveeseen vaikuttaa. Kuvassa 31 on esitetty erilaisia kysynnänjouston kuormanohjausmalleja automaatiojärjestelmän avulla toteutettuna sekä ohjausvasteeseen vaikuttavia viiveitä.



Kuva 31. Kysynnänjouston automaatiomalli sekä ohjausvasteeseen vaikuttavia viiveitä.

Vastaavasti kuvassa 32 on esitetty kuorman todentamiseen liittyvä tiedonsiirtoketju, joka koostuu myös useista eri osatekijöistä. Tällöin tiedonsiirtoviivettä kertyy myös kuorman todentamiseen liittyen.



Kuva 32. Kuorman todentaminen ja tiedonsiirtoketjun viiveet.

Toteutunut kysynnän jouston ohjaus voi sisältää useita vaiheita. Näitä voivat olla muun muassa kuorman sen hetkisen tilan ja pudotettavan kuorman suuruuden varmistaminen, kuorman pudotuksen ohjaaminen sekä toteutuneen kuorman pudotuksen todentaminen. Tällöin voidaan ymmärtää, että järjestelmäkokonaisuuden tulee olla hyvin reaaliaikainen, jotta esimerkiksi reservimarkkinoiden vaatimukset voidaan täyttää.

6.1.2 Kuormien todentaminen

Kysynnän jouston kannalta on oleellista tuntea ja tietää kuormien käyttäytyminen ja reaaliaikainen sähköteho. Mikäli kysynnän joustoa harjoitetaan reservimarkkinoilla, tulee toteutuneiden ohjausten teho vaikutukset todentaa jollakin tavoin. Tämä edellyttää laite- tai järjestelmäkohtaista mittausta. Reaaliaikainen mittaaminen edellyttää väyläpohjaisten mittalaitteiden käyttöä. Suositeltavia tapoja tehonmittauksen toteuttamiseksi olisi muun muassa:

- Erillislaitteilta, kuten taajuusmuuttajilta, jäähdytyskoneilta tai lämpöpumpuilta tehotieto on saatavissa usein väylätietona. Tämä edellyttää laitteiden liittämisen väyläliityntänä muuhun automaatiojärjestelmään.
- Niiltä ohjattavilta kuormilta, joilta ei tehotietoa ole muulla tavoin saatavilla, on toteutettava erillinen jälkimittaus.

- Mittaukset voidaan toteuttaa erillismittauksin esimerkiksi ryhmäkeskuksissa sillä laajuudella kuin on tarvetta.
- Mittaukset tulisi olla liitettävissä muuhun automaatiojärjestelmään.

6.2 Ilmanvaihdon ohjattavuus kysynnän joustossa

Ilmanvaihdon soveltuvuutta tutkittiin käytännön kenttäkokein. Suoritettujen kenttäkokeiden perusteella lyhytaikainen ilmanvaihtokoneiden pysäyttäminen olisi mahdollista ainakin kyseisessä kohteessa. Tässä työssä kenttätestit toteutettiin koulurakennuksessa. Opetustilat ovat haasteellisia kysynnän jouston kannalta, koska tiloissa on yleensä paljon ihmisiä suhteessa tilan ilmatilavuuteen. Tällöin ilmanvaihdon muutokset vaikuttivat nopeasti tilojen ilmanlaatuun. Kuitenkin tehtyjen kokeiden perusteella voidaan olettaa, että muutamia kertoja päivässä tapahtuva kuorman ohjaaminen olisi mahdollista näissäkin tiloissa. Suositeltava tapa olisi pudottaa ilmanvaihdon käyntiä esimerkiksi 40 %:lle normaalista ilmamäärästä, jolloin puhaltimien käyttämä sähköteho putoaa jo noin 70–80 %:iin. Tällöin tiloissa säilyisi ohjausjaksonkin aikana minimi-ilmanvaihto.

Ilmanvaihdon soveltuvuus kysynnän joustoon riippuu huomattavasti ilmanvaihtojärjestelmän toteutustavasta. Taulukossa 12 on esitetty eri ilmanvaihdon ohjausvaihtoehtoja sekä järjestelmien reunaehdot ja esteitä kysynnän joustossa.

Taulukko 12. Ilmanvaihdon ohjattavuus automaation näkökulmasta.

JÄRJESTELMÄ	OHJAUSVAIHTO-EHDOT	TOIMINNALLISET REUNA-EHDOT (tekniset)	EI TOIMINNALLISET REUNA-EHDOT (lait, määräykset yms.)	ESTEET KÄYTTÖÖNOTOLLE
Ilmanvaihto:	Olosuhdesäätöiset	<ul style="list-style-type: none"> - vaatii tilakohtaisen olosuhdesäädön (älykäs ohjaus) - aikaohjelma ja/tai läsnäolo 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava sisäilmaston olosuhteet (rakentamismääräyskokoelma D2, sisäilmastoluokitus 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - ei laajalti vielä käytössä - kysynnän jousto-ohjattavuutta ei huomioituna ohjelmoinnissa
	Osa-/täysi-ilmamäärä	<ul style="list-style-type: none"> - aikaohjelma/käsiohjaus/läsnäolo-ohjaus 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava sisäilmaston olosuhteet (rakentamismääräyskokoelma D2, sisäilmastoluokitus 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - kysynnän jousto-ohjattavuutta ei huomioituna ohjelmoinnissa - ei normaalisti olosuhdemittauksia
	Päällä/Pois	<ul style="list-style-type: none"> - aikaohjelma/käsiohjaus/läsnäolo-ohjaus 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava sisäilmaston olosuhteet (rakentamismääräyskokoelma D2, sisäilmastoluokitus 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - kysynnän jousto-ohjattavuutta ei huomioituna ohjelmoinnissa - ei normaalisti olosuhdemittauksia
	Paketti IV-koneet (omalla automaatiokalla)	<ul style="list-style-type: none"> - tulee olla liitettävissä/integroitavissa muuhun kiinteistöautomaatioon - aika ohjelma/käsiohjaus/ läsnäolo-ohjaus 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava sisäilmaston olosuhteet (rakentamismääräyskokoelma D2, sisäilmastoluokitus 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> - kysynnän jousto-ohjattavuutta ei huomioituna ohjelmoinnissa → tulee huomioida vakio-ohjelmissa - ei normaalisti olosuhdemittauksia
	Erillispoistot	<ul style="list-style-type: none"> - tulee olla ohjattavissa kiinteistöautomaatiosta - aika ohjelma/käsiohjaus/ olosuhde- tai läsnäolo-ohjaus 	<ul style="list-style-type: none"> - erityistilojen poistojen pysäytys huomioitava 	<ul style="list-style-type: none"> - kysynnän jousto-ohjattavuutta ei huomioituna ohjelmoinnissa

Ilmanvaihdon soveltuvuuteen kysynnän joustossa vaikuttaa lisäksi hyvin paljon millaisia tiloja ilmanvaihdolla palvellaan. Suuret tilat, kuten liikerakennukset, voivat omata paljon enemmän ilmatilavuutta suhteessa tiloissa oleviin käyttäjiin verrattuna esimerkiksi opetusrakennuksien luokkatiloihin. Tämä vaikuttaa oleellisesti siihen, kuinka nopeasti esimerkiksi ilmanvaihdon pudottaminen vaikuttaa sisäilman olosuhteisiin.

Ilmanvaihdon hyödyntäminen kysynnän joustossa edellyttää aina jonkin tasoisia muutoksia verrattuna perinteiseen toteutukseen. Ilmanvaihtokoneiden osalta tämä voi tarkoittaa muun muassa seuraavaa:

- Olemassa olevat kohteet vaativat aina vähintäänkin jonkin tasoisen ohjelma-muutoksen.
- Uusissa kohteissa kysynnän jouston toiminnallisuudet tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Perinteiset toteutusratkaisut eivät huomioi kysynnän jouston ohjauksia.
- Pysäytys olisi suhteellisen helppo toteuttaa nykyjärjestelmillä, mutta mahdollistaa yleensä vain lyhytaikaisen ohjauksen esimerkiksi häiriötilanteen varalta.

- Uudemmat ilmanvaihtokoneet käyvät usein kahdella eri teholla: käyttöajan ilmamäärällä ja käyttöajan ulkopuolisella osailmamäärällä. Osailmamäärälle pudottaminen on näissä helppo toteuttaa, mutta kanavapaineasetuksen muutoksella tehovaikutuksen reagointi on usein hidas. Nopeampi tehon pudottaminen vaatii säädön toteuttamisen perinteisestä toteutuksesta poikkeavalla tavalla.
- Olosuhdemittausten tulisi olla aina reunaehtoina kysynnän jouston ohjauksille. Yleensä tämä edellyttää normaalia toteutusta laajemmin toteutettuja olosuhdemittauksia.

6.3 Yleisvalaistuksen ohjattavuus kysynnän joustossa

Yleisvalaistuksen soveltuvuutta testattiin kohteessa, jossa oli jo lähtökohtaisesti nykyaikainen valaistuksen ohjausjärjestelmä. Tällöin valaistustason voimakkuutta voitiin ohjelmallisesti säätää. Valtaosa kiinteistöjen valaistuksesta on kuitenkin toteutettu tavalla, joka ei suoraan mahdollista kysynnän jousto-ohjausten toteuttamista.

Yksinkertaisimmillaan valaistusta voitaisiin ohjata kytkentäryhmittäin, jolloin esimerkiksi osa valaistusta kytkettäisiin pois päältä. Ryhmäkohtaista ohjaamista ei voida toteuttaa täysin huomaamattomasti, jolloin ohjaaminen olisi suositeltavaa ainoastaan häiriötilanteen osalta.

Väyläpohjaisilla ratkaisuilla, kuten DALI tai KNX, olisi mahdollista toteuttaa myös taloudellista kysynnän joustoa. Tämä mahdollistaa huomaamattoman valaistuksen ohjaamisen ainakin 30 % pudottamiseen asti. Häiriötilanteiden varalta olisi mahdollista pudottaa vielä enemmänkin. Standardin SFS-EN 12464-1 mukaisia arvoja valaistuserojen havaitsemisesta voitaisiin pitää lähtökohtana kuinka paljon kyseisen tilan valaistusvoimakkuuksien tasoa voidaan pudottaa.

Valaistusohjaukset olisi suositeltavaa sijoittaa omiin ryhmäkeskuksiin tai ryhmäkeskusiin, jotta esimerkiksi ryhmäkohtainen ohjaaminen tai reaaliaikainen tehomittaaminen olisi mahdollista. Turvallinen valaistus on kuitenkin taattava tilanteesta riippumatta. Valaistuksen ohjattavuutta kysynnän jouston kannalta automaation näkökulmasta voidaan kuvata taulukon 13 esittämällä tavalla.

Taulukko 13. Valaistuksen ohjattavuus automaation näkökulmasta.

JÄRJESTELMÄ	OHJAUSVAIHTOEHDOT	TOIMINNALLISET REUNA-EHDOT (tekniset)	EI TOIMINNALLISET REUNA-EHDOT (lait, määräykset yms.)	ESTEET KÄYTTÖÖNOTOLLE
Valaistus:	Säädettävä sisävalaistus	<ul style="list-style-type: none"> - vaatii älykkään valaistusjärjestelmän/säädettävän valaistuksen - integrointi/ohjaus kiinteistöautomaatiosta 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava standardinmukaiset valaistusolosuhteet 	<ul style="list-style-type: none"> - ei yleisesti vielä käytössä (edistyskellinen) - järjestelmän ohjelmoinnissa ei huomioida kysynnän jouston näkökulmaa
	Ryhmiteltävä sisävalaistus	<ul style="list-style-type: none"> - vaatii perusratkaisua monipuolisemman sähköryhmittelyn - ohjaus kiinteistöautomaatiosta 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava standardinmukaiset valaistusolosuhteet 	<ul style="list-style-type: none"> - kytkentäryhmittelyä ei ole toteutettu kysynnän jouston näkökulmasta
	Ulkovalaistus	<ul style="list-style-type: none"> - voi vaatia perusratkaisua monipuolisemman sähköryhmittelyn - ohjaus kiinteistöautomaatiosta 	<ul style="list-style-type: none"> - huomioitava turvallisuus tekijät 	<ul style="list-style-type: none"> - kytkentäryhmittelyä ei ole toteutettu kysynnän jouston näkökulmasta
	Muu ulkovalaistus	- ohjaus automaatiosta (esim. mainosvalaistus)		
	Ei ohjattavissa oleva valaistus (esim. turvavalistus)	- ei mahdollista ottaa kysynnän joustoon		

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkön käytön kasvaminen ja tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi lisäävät väistämättä uusiutuvan energiantuotannon osuutta. Tämä tuo uudenlaisia haasteita perinteisen sähkövoimajärjestelmän ja sähköverkkojen hallintaan. Sähkönkulutuksen luonne on muuttumassa entistä epätasaisemmaksi ja päivittäiset vaihtelut ja kulutuspiikit voivat olla hyvinkin suuria. Tehopiikkien sähköntarpeen tuottaminen ainoastaan sähköntuotannon keinoin ei ole taloudellisesti järkevää. Kulutuksen mukautuminen sähkövoimajärjestelmän eri kuormitustilanteisiin mahdollistaa taloudellisen vaihtoehdon lisätä sähköjärjestelmän joustavuutta. Sähkökuormien ohjaamista tässä tarkoituksessa kutsutaan kysynnän joustoksi. Älykkäiden sähköverkkojen ja kysynnän jouston ratkaisut vaativat useiden eri toimijoiden hyvää yhteistyötä sekä eri järjestelmien yhteensopivuutta. Suurena haasteena onkin toimivan kokonaisuuden toteuttaminen.

Kysynnän jousto on moni-ilmeinen ja -tahoinen kokonaisuus, jossa useiden eri toimijoiden ja järjestelmäkokonaisuuksien tulisi toimia saumattomasti keskenään. Laajempi ja monipuolisempi kysynnän jousto vaatii muun muassa järjestelmien ja tiedonsiirron parempaa reaaliaikaisuutta, tiedonsiirron ja eri järjestelmien integraatiota yli perinteisten rajojen sekä kiinteistöjen puolella uudenlaisia toimintamalleja automaation ja sähköjärjestelmien toteuttamiseen. Kysynnän joustoa voidaan harjoittaa esimerkiksi kuluttajalähtöisesti markkinahintaan perustuen tai keskitetysti sähkövoimajärjestelmän tarpeesta.

Tarvetta erityyppisille kysynnän jouston malleille on Suomessa jo tällä hetkellä. Lähtötilaisuuksissa suurimman yksittäisen voimalaitoskoon kasvaminen lisää verkon nopean reservin tarvetta. Lisäksi kysynnän jousto nähdään potentiaaaliltaan yhtenä suurimmista kuluttajille lisäarvoa tuottavista osa-alueista. Kiinteistökuormat voidaan käsittää hajautettuna resurssina siinä missä hajautettu tuotanto tai energiavarastotkin. Tätä hajautettua resurssia on mahdollista hyödyntää niin sähköjärjestelmän tarpeisiin kuin kuluttajienkin hyödyksi. Kysynnän joustoa voidaan harjoittaa tällä hetkellä jo useilla markkinapaikoilla.

Diplomityö tehtiin osana ”Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR-pooli)” – hanketta. Työssä selvitettiin ilmanvaihdon ja valaistuksen soveltuvuutta kysynnän joustoon. Työ rajattiin suurempien kiinteistöihin, kuten liike-, toimisto- ja koulurakennuksiin, jotka omaavat jo lähtökohtaisesti kysynnän jouston mahdollistavat talotekniset järjestelmät. Tämän tyyppisissä kiinteistöissä taloteknisiä järjestelmiä ja tarvittavia sähkökuormia ohjataan jo hyvin usein kiinteistöautomaatiojärjestelmän ohjaamana. Kuormien soveltuvuutta tutkittiin käytännön kenttäkokein olemassa olevassa koulurakennuksessa.

Keskeisimpinä tutkimuskysymyksinä oli selvittää mitä potentiaalisia ohjattavia kuormia on liike-, toimisto- ja koulurakennuksissa kysynnän jouston kannalta sekä millaisia ohjaustapoja ja -järjestelmiä voitaisiin hyödyntää kysynnänjouston toteutuksessa näissä kiinteistöissä. Yksi keskeinen haaste kysynnän jouston yleistymiseen kiinteistökuormienkin osalle on eri järjestelmien ja palveluntarjoajien tiedonsiirron ja kommunikoinnin integraatiossa. Työssä selvitettiin lisäksi millaisia vaihtoehtoja on tällä hetkellä olemassa kiinteistöjen rajapinnassa kysynnän jouston tarpeisiin.

Työssä onnistuttiin toteuttamaan tavoitteen mukaiset kenttäkokeet, joiden avulla voitiin ensinnäkin selvittää ohjauksen olosuhdevaikutuksia sekä arvioida järjestelmien kuormapotentiaalia ja millaisia teknisiä muutoksia tämä edellytti. Olemassa oleviin järjestelmiin konkreettisia muutoksia tehtäessä huomattiin muun muassa, että nykyisiin automaatio-ohjelmiin tehdyt muutokset oli huomattavasti työläämpi toteuttaa jälkikäteen.

7.1 Kiinteistökuormien potentiaali

Kiinteistökuormien osalta kysynnän jouston haasteena on saada ensinnäkin selville kuinka suuria kuormia kiinteistöissä ylipäättään on ja kuinka suuria tehokokonaisuuksia kiinteistökuormilla voidaan saavuttaa. Oleellista on osata lisäksi arvioida kuormien tehokäyttäytymistä suhteessa kysynnän jouston ohjaustarpeeseen. Liike-, toimisto- ja koulurakennusten toteutusratkaisut eri kiinteistöjen välillä eroavat rakennusajankohdan ja käyttötarkoituksen mukaan. Tällöin todellisen kuorman ohjauspotentiaalın arvioiminen on haastavaa.

Suuruusluokkaa eri kuormatyyppien sähkötehoista pyrittiin arvioimaan mitoitusperusteisesti liike-, toimisto- ja koulurakennuksille. Ilmanvaihdon kuormapotentiaaliksi koko rakennuskannassa saatiin noin 410 MW, jäähdytykselle 340 MW, valaistukselle 1000 MW ja sulanapidoille 70 MW. Nämä tehoarvot ovat käyttötilanteen mukaisia maksimitenhoja, mikä tarkoittaa, että vain osa tästä tehosta olisi käytettävissä kysynnän joustoon. Järjestelmien sähkön käyttö riippuu voimakkaasti muun muassa tilojen käyttöajoista ja -asteista sekä esimerkiksi ulkolämpötilasta. Lisäksi käytettävissä oleva potentiaali riippuu hyvin paljon tapauskohtaisesti järjestelmän toteutuksesta. Edellä esitettyjen arvioiden pohjalta voidaan kuitenkin todeta, että jo pelkästään liike-, toimisto- ja koulurakennuksien kiinteistökuormat omaavat tehopotentialinsa puolesta suhteellisen helposti ohjattavia kuormia osaksi kysynnän joustoon.

7.2 Suositukset kysynnän jouston huomioimiseksi suunnitteluvaiheessa

Kohteissa, joissa on tai lähtökohtaisesti toteutetaan jo muutenkin kiinteistöautomaatiojärjestelmä, on luonnollisinta, että kuormien ohjaaminen kysynnän joustossa toteutetaan juuri automaation ohjaamana. Hajautetut ja integroidut automaatiojärjestelmät

mahdollistavat esimerkiksi eri järjestelmien, kuten valaistusjärjestelmien, liittämisen yhdeksi kokonaisuudeksi. Vastaavasti automaation hajauttaminen esimerkiksi ryhmäkeskustasolle mahdollistaa kuormakohtaisen ohjaamisen sekä kuormien mittaamisen.

Kysynnän jouston edistäminen kiinteistökuormien osalta edellyttäisi ohjeistuksia ja toimintamalleja jo suunnitteluun. Ensinnäkin automaation asiantuntemus tulisi olla paremmin edustettuna jo hankesuunnitteluvaiheessa, koska esimerkiksi kiinteistöjen energiatehokkuus ja toimivan taloteknisten kokonaisuuden toteuttaminen pohjautuu yhä enemmän automaatiojärjestelmiin.

Kysynnän jouston toiminnallisuuksista tulisi toteuttaa toimintakuvaukset sähkö- ja automaatio suunnittelun pohjaksi. Lisäksi eri sähkökuormat tulisi ainakin karkeasti jaotella soveltuvuudeltaan eri kysynnän jousto ohjauksiin. Taloteknisten järjestelmien toiminnot tulisi priorisoida tapauskohtaisesti esimerkiksi sen suhteen mitkä olosuhde tai turvallisuus toiminnot ajavat aina kysynnän jouston ohjauksen edelle. Myös käyttäjien tahto kuten paikallinen esto toiminnoille, tulee huomioida toimintoja määriteltäessä. Kiinteistöautomaatiojärjestelmälle tulisi asettaa minimivaatimukset kysynnän jouston kannalta. Edellytyksenä voisi olla esimerkiksi standardin EN-SFS 15232 B-luokitus automaatiolle. Käytettävät ja suositeltavat tiedonsiirtomedit tulisi määritellä ja tiedonsiirron reaaliaikaisuudelle sekä tietoturvan vaatimuksille tulisi asettaa minimivaatimukset kysynnän jouston kannalta.

Toiminnallisiksi vaatimuksiksi kiinteistöautomaatiojärjestelmille kysynnän jouston näkökulmasta voidaan pitää muun muassa järjestelmien reaaliaikaisuutta, ohjaustoimintojen priorisointia, sähkökuormien tilan mittaamista ja todentamista, järjestelmien integroitavuutta sekä tietoturvaan liittyviä asioita. Nämä asettavat järjestelmille rajoituksia esimerkiksi tiedonsiirtonopeuteen, rajapintayhteensopivuuteen ja toimintavarmuuteen liittyen.

Kiinteistöjen ja kiinteistöjen ulkopuolisten verkkojen ja palveluiden kommunikointi rajapinnalle tulisi löytää kansallisesti sopivimmat vaihtoehdot. Rajapinnan tulisi olla standardoitu ja kansainvälisesti tunnustettu. Tämä mahdollistaisi tuotekehityksen niin laite-, järjestelmä- kuin palveluidenkin tasolla. Koton diplomityössä, Tietojärjestelmien väliset rajapinnat sähköjakeluverkon rajapinnassa, tutkittiin muun muassa sähköjakeluverkkojen tietojärjestelmien tilannetta. Työn yhtenä tuloksena todettiin, että kansallinen suositus tietojärjestelmille olisi tukea CIM tietomallia (Koto, 2009). Tämä tukee IEC CIM:n rajapinnan määrittelyä myös kiinteistöjen rajapinnaksi. Muut tässä työssä kuvatut rajapintavaihtoehdot sisältävät tällä hetkellä todennäköisesti kuitenkin monipuolisemmat mahdollisuudet kysynnän jousto ohjauksiin. Näiden rajapintojen toimivuutta tulisi pystyä vertailemaan ensin käytännön pilottihankkeiden avulla myös kansallisesti.

7.3 Ilmanvaihdon ja yleisvalaistuksen soveltuvuus kysynnän joustoon

Koejärjestelyt toteutettiin Tampereen ammattikorkeakoulun tiloissa vuonna 2013 peruskorjatussa rakennusosassa. Kohteessa on täten nykymääräyksiin toteutetut talotekniset järjestelmät ja kohde kuvaa hyvin tällä hetkellä rakennettavien rakennusten taloteknisten järjestelmien soveltuvuutta kysynnän joustoon. Ilmanvaihdon soveltuvuutta testattiin pysäyttämällä ilmanvaihtokoneet hetkellisesti sekä pudottamalla koneiden ilmamäärät noin 40 – 50 %:iin normaalin käyttöajan ilmamäärästä 15 minuutin ajaksi. Ohjauksen olosuhdevaikutuksia seurattiin tilojen hiilidioksidipitoisuusmittausten perusteella sekä toteutunutta kuormapotentiaalia taajuusmuuttajien tehomittauksilla. Valaistusjärjestelmän soveltuvuutta testattiin kohteen valaistuksen suhteen yhden kerroksen osalta. Nykyiseen valaistusjärjestelmään tehtiin tarvittavat muutokset, jotta järjestelmään voitiin ohjata 30 %:n valaistustason pudotus sen hetkisestä tilanteesta. Ohjauksen vaikutuksia valaistusolosuhteisiin arvioitiin mittaamalla tilojen valaistusvoimakkuuksia sekä kahdella eri oppilasryhmälle tehdyllä kyselyllä.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta sekä ilmanvaihto-, että valaistusjärjestelmien soveltuvan kysynnän joustoon. Ilmanvaihtokoneiden ilmamäärä pystyttiin pudottamaan noin 40 %:iin normaalista ilmamäärästä, jolloin saavutettu tehopudotus oli noin 75 %. Hiilidioksidipitoisuuksien liukuvat tuntikeskiarvot ylittivät tavoitearvot vain hetkellisesti yhden tilan osalta. Tavoitearvoina pidettiin Sisäilmastoluokituksen laatuluokkaa S2, jonka edellytyksenä on, että hiilidioksidipitoisuuden tulee olla alle 900 ppm:ää vähintään 90 % käyttöajasta. Kuuden ilmanvaihtokoneen pudottaminen osailmamäärälle mahdollisti käyttöaikana noin 18 – 20 kW ohjauspotentiaalin. Suhteutettuna tämä koko rakennusosan bruttoalaan se tarkoittaa noin 2,5 – 3 W/m². Tehopudotus oli saavutettavissa taloteknisten järjestelmien osalta nopeimmillaan alle 15 sekunnissa.

Valaistuksen pudottaminen 30 % normaalista valaistustasosta pudotti tilojen valaistusvoimakkuutta noin 150 luxia. Kyselyn perustella koeryhmästä 25 % havaitsi valaistuksessa poikkeavia muutoksia testijakson aikana. Muutoksia pidettiin kuitenkin vain hieinan häiritsevinä. Opetus- ja työhuoneiden säädettävän sisävalaistuksen joustopotentiaalia koko rakennusosassa arvioitiin olevan käyttöaikana arviolta noin 3 – 6 kW. Bruttopinta-alan suhteutettuna tämä tarkoittaa noin 0,5 – 1,0 W/m². Tehopudotus oli mahdollista toteuttaa lähes huomaamattomasti 30 sekunnin pudotusrampilla. Tuloksissa on huomioitava, että kohteen käytävä- ja aulavalaisukset eivät olleet säädettävissä.

Tutkimuksen ja laskelmien perusteella TAMK:n kokoisessa kiinteistössä olisi potentiaalia osallistua kysynnän jouston reservi- ja säätösähkömarkkinoille. Taulukossa 14 on esitetty kenttätestien tulokset koottuna ja arvio potentiaalista koko TAMK:n kiinteistössä. Oletuksena on pidetty, että koko kiinteistössä olisi vastaavat talotekniset järjestelmät kuin testatussa rakennusosassa.

Taulukko 14. Koonti ilmanvaihdon ja valaistuksen testituloksista

Järjestelmä	Laajuus	Ohjaus	Aikaviive	Tehovaikutus käyttöaikana (H-osa, 6800m ²)	Arvio koko kiinteistössä (47000m ²)
Ilmanvaihto	Koko rakennusosan ilmanvaihto (6 ilmanvaihtokonetta)	pudotus noin 40 % ilmamäärälle	alle 15 s	18-20 kW	noin 130 kW
Yleisvalaistus	Koko rakennusosan säädettävä valaistus (opetus- ja työtilat)	pudotus 30 %	noin 30 s	3-6 kW	noin 30 kW

Pelkästään joustopotentialin näkökulmasta ajateltuna olisi kyseisellä kokonaisohjaus-potentialilla mahdollisuus osallistua jo yksistään taajuusohjattujen käyttöreservien markkinoille, jotka edellyttävät minimissään 100 kW suuruisen ohjauspotentialin. Ky-seisiä kiinteistökuormien hyödyntäminen muille reservi- ja säätösähkömarkkinoille edellyttäisi useiden kohteiden kuormien yhdistämistä suuremmaksi kuormakokonaisuudeksi.

Lisäksi ilmanvaihdon ja yleisvalaistuksen sähkökuormat olisi ohjattavissa taloteknisten järjestelmien osalta melko nopeasti. Kysynnän jouston reservi- ja säätömarkkinoiden näkökulmasta tämä tarkoittaisi, että aktivoitumisaikavaatimusten puolesta kuormat olisivat käytettävissä taajuusohjatuiksi käyttöreserveiksi, nopeisiin häiriöreserveihin sekä säätösähkömarkkinoille.

Myös kuormien todentaminen ilmanvaihdon ja yleisvalaistuksen suhteen olisi toteutettavissa case -kohteen osalta jo olemassa olevilla järjestelmillä. Tämä mahdollistaisi kuormien osallistumisen myös sellaisille kysynnän jouston markkinoille, joilla edellytyksenä on esimerkiksi toteutuneen tehopudotuksen todentaminen.

7.4 Jatkotutkimuskohteet

Kiinteistöjen sähkökuormien tehokäyttäytymistä tunnetaan hyvin huonosti. Kysynnän joustopotentialin tarkempaa arviointia varten olisi oleellista selvittää vähintään tunti-mittausdataan perustuen eri kuormien ja järjestelmien tehokäyttäytymistä. Tehotietoja olisi oleellista saada vielä kuormaryhmäkohtaisesti, koska eri kiinteistökuormat käyttäytyvät hyvin eri tavalla. Jotta kiinteistökuormilla voitaisiin osallistua tämän hetken reservimarkkinoille, tulisi kuormapotentialia olla suhteellisen paljon. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että useiden kiinteistöiden kuormat tulisi koota kokonaisuudeksi. Se kun- ka useista kohteista koostuvan kiinteistökuormakokonaisuus soveltuu eri reservimarkki- noille, olisi tarpeellista selvittää niin mahdollisten mallintamisten kuin käytännön pilot- tihankkeiden avulla.

Kysynnän jouston toiminnallisuuksista ja käytännön suunnitteluratkaisuista tulisi toteut- ta selkeät ja yksinkertaiset suositukset suunnitteluun ja järjestelmien toteutukseen. Tä- mä edellyttäisi soveltuvimpien teknisten ratkaisuiden, tiedonsiirtomedioiden ja -

rajapintojen määrittelyä. Kysynnän jouston edistämiseksi parhaiten soveltuvat ratkaisut tulisi saada tämän jälkeen sisällettyä rakentamista ohjaavaan lainsäädäntöön ja määräyksiin.

LÄHTEET

- Aalto-yliopisto. (2014). Smart Control Architecture for Smart Grids - SAGA hankkeen verkkosivut. Saatavissa (viitattu 4. 1 2015): <http://energyefficiency.aalto.fi/en/research/saga/>
- ABB. (2014). Controlling Service Point Level Smart Devices in a Distribution Network using IEC CIM (Specification). SGEM Report. Saatavissa (viitattu 12.12.2014): http://www.cleen.fi/en/SitePages/publicdeliverables.aspx?fileId=2279&webpartid=g_1449a1fa_9f05_4750_900e_6294262dcbd4
- ABB. (2014). Kalasataman älykkäät energiaratkaisut ja IEC 61968-9 CIM-rajapinta älykkäisiin laitteisiin. Harri Liukun esitys 29.10.2014. Energiakonferenssi 2014, Tampere. Saatavissa (viitattu 12.1.2015): http://www.promaint.net/instancedata/prime_product_yhdistys/kp-media/embeds/promaintwwwstructure/a2.pdf.
- ABB. (2014). Smart Grid Control, Adjustment and Connection to Building Automation. Harri Liukun esitys. Vaasa Energy Week -seminaari, Vaasa. Saatavissa (viitattu 12.1.2015): <http://energyweek.fi/wp-content/uploads/2014/03/Harri-Liukku.pdf>
- AIRIX Talotekniikka. (2011). TAMK H-rakennus, sähkösuunnitelmat. AIRIX Talotekniikka.
- Arkkitehtitoimisto Lasse Kosunen Oy. (2010). Hankesuunnitelma, TAMK G/H -rakennus. Tampere, Arkkitehtitoimisto Lasse Kosunen Oy.
- Britton, J. P. (2009). Specifying the Use of CIM in an EMS Project. Power Systems Conference and Exposition . IEEE.
- CENELEC. (2014). CENELEC verkkosivut: Documents open for vote/commen. Saatavissa (viitattu 3.1.2014): http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:190:11718933167205::::FSP_GROUP_ID:1258281
- CENELEC. (2014). DRAFT prEN 50491-12 : Part 12: Smart grid - Application specification - Interface and framework for customer. Brussel, CENELEC.
- CLEEN Oy. (2014). Cleen Oy verkkosivut: Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat (SGEM). Saatavissa (viitattu 4.1.2015): <http://www.cleen.fi/fi/sgem>
- Danfoss. (2015). VLT® HVAC Drive BACnet Operating Instructions. Danfoss. Saatavissa (viitattu 18.12.2014): <http://www.danfoss.com/Finland/BusinessAreas/DrivesSolutions/Documentations/Technical+Documentation.htm>

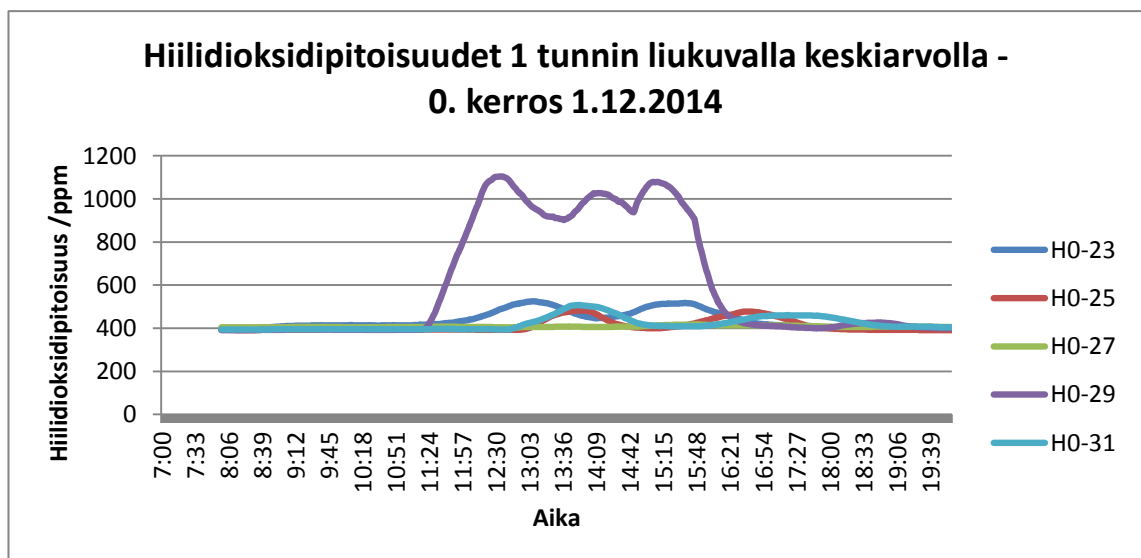
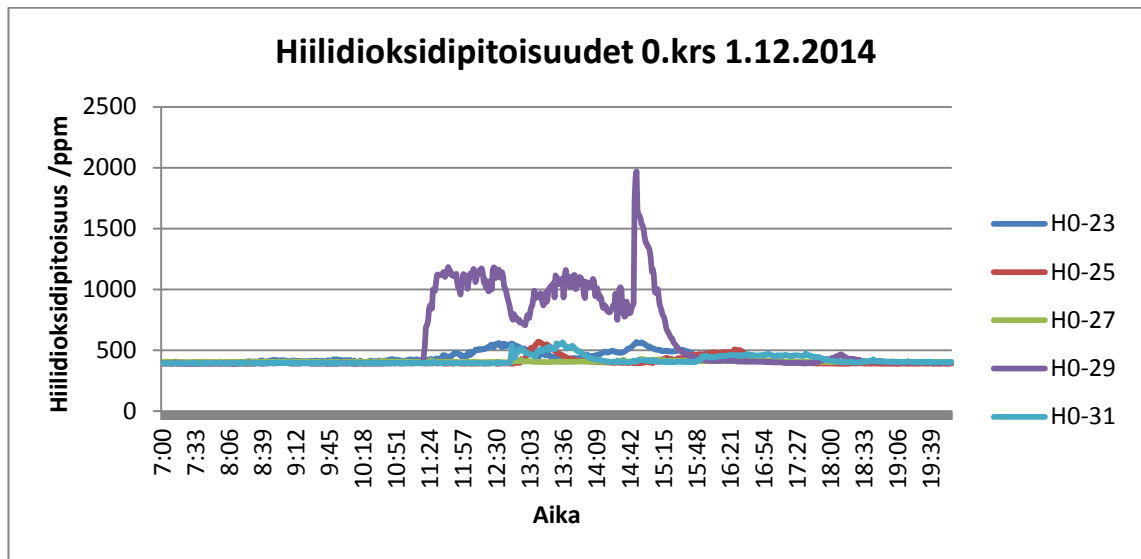
- DR-pooli. (2015). Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille. Tutkimusprojektin loppuraportti. DR-pooli.
- EEBus Initiative e.V. (2013). EEBus White Paper 2.0. Cologne. EEBus Initiative e.V. Saatavissa (viitattu 2.12.2014): http://www.eebus.org/fileadmin/Mediapool/Download/2013_09_EEBus_Whitepaper_2__e_.pdf
- EEBus Initiative e.V. (2014). EEBus Initiative e.V, verkkosivut. Haettu 28.12.2014 osoitteesta: <http://www.eebus.org/en/eebus-initiative-ev/>
- Oulun Energia. (2014). Energiayhtiön näkökulma kuormanohjaukseen -pilotti. Mikko Rasin esitys 5.11.2014. Sähkön kysyntäjoustoseminaari, Vantaa.
- Fingrid Oyj. (2015). Fingrid Oyj verkkosivut: Kysyntäjoustoprojektit. Saatavissa (viitattu 3.1.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/kysyntajoustoprojektit/Sivut/default.aspx>
- Fingrid Oyj. (2015). Taajuusohjattujen reservien ylläpidon sovellusohje 1.1.2015 alkaen. Fingrid Oyj. Saatavissa (viitattu 7.1.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimajarjestelmaliitteet/Reservit/2014/Liite2%20-%20Taajuusohjattujen%20reservien%20yll%C3%A4pidon%20sovellusohje%202015.pdf>
- GeSI. (2012). GeSI SMARTer2020, report. Global e-Sustainability Initiative aisbl and The Boston Consulting Group, Inc.
- Hallila, M. (2009). Kantaverkon käyttövarmuus ei saa horjua. Fingrid Oyj:n asiakaslehti. Numero 3. Fingrid Oyj. s.4-6. Saatavissa (vitattu 13.12.2014): http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Yrityislehdet/2009/Fingrid_3_09.pdf
- Heiskanen, E.;Matschoss, K.;& Saastamoinen, M. (2012). Asiakkaan näkökulma älykkään sähköverkon lisäarvoon. Julkaisu. Helsinki. Kuluttajatutkimuskeskus. Saatavissa (viitattu 2.12.2014): http://energia.fi/sites/default/files/2012_02_julkaisu_alyverkko_korjattu.pdf
- Helsingin kaupunki. (2013). Kalasataman älykkäät energiajärjestelmät, ohje suunnittelijalle. Kalasataman älykkäät energiajärjestelmät -hanke. Saatavissa (viitattu 20.12.2014): http://www.hel.fi/static/kv/tontti/Verkkosaaren_asuinkorttelit/SUUNNITTELIJAN%20OHJE.pdf
- Hohpe, G.;& Woolf, B. (2011). Enterprise Integration Patterns: Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions (15th edition). Massachusset: Pearson Education, Inc.

- Honeywell. (2015). Honeywell, verkkosivut. Saatavissa (viitattu 11.1.2015):
<http://honeywell.com/sites/hbs/produkte/Systeme/Pages/systemintegration.aspx>
- IPPC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change 2013.
- Kaivo, V. (2006). TAC Finland Oy: uusi hajautettu ilmastoinnin ohjausjärjestelmä. Tutkintotyö. Tampere. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Koto, A. (2009). Tietojärjestelmien rajapinnat sähkönjakeluverkon käyttötoiminnassa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Larinkari, J. (2012). Palvelusektorin sähkönkäytön tutkiminen tuntimittaus tietojen avulla. Diplomityö. Helsinki. Aalto yliopisto.
- McMorran, A. W. (2007). An Introduction to IEC 61970-301 & 61968-11: The Common Information Model. Raportti. University of Strathclyde.
- Newsham, G. R., Birt, B. (2010). Demand-responsive lighting : a field study. Tutkimusraportti. National Research Council Canada.
- OpenADR Alliance. (2013). OpenADR 2.0b Profile Specification . Raportti. OpenADR Alliance.
- OpenADR Alliance. (2015). OpenADR Alliance verkkosivut. Saatavissa (viitattu 3.1.2015): <http://www.openadr.org/>
- Paakki, J. (2011). Ohjelmistojen vaatimusmäärittely, luentokalvot. Saatavissa (viitattu 5.1.2015): <http://www.cs.helsinki.fi/u/paakki/Vaatimus-11-Luentokalvot-1.pdf>
- Pentikäinen, J. (12 2014). Kiinteistöautomaatio on herkkä verkkohyökkäyksille. Sähkömaailma-lehti. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. s.24.
- Pihlajanmaa, P., Linne, M. (2012). Energiakatselmusraportti, TAMK:n energiatehokkuussopimukseen liittyvä kiinteistön energiakatselmus. Tampere. Tampereen ammattikorkeakoulu .
- Piikkilä, V. (2012). Rakennusautomaatiojärjestelmät, ST-käsikirja 17. Espoo. Sähkötieto ry.
- Rakennustieto Oy. (2012). Sisäilmastoluokitus 2008. Rakennustietosäätiö RTS.
- Schneider Electric. (2011). Designing a metering system for small and medium-sized buildings. Raportti. Saatavissa: http://www.schneider-electric.com/solutions/au/en/med/4664431/application/pdf/1221_whitepaper_sems_v141210.pdf. Schneider Electric.

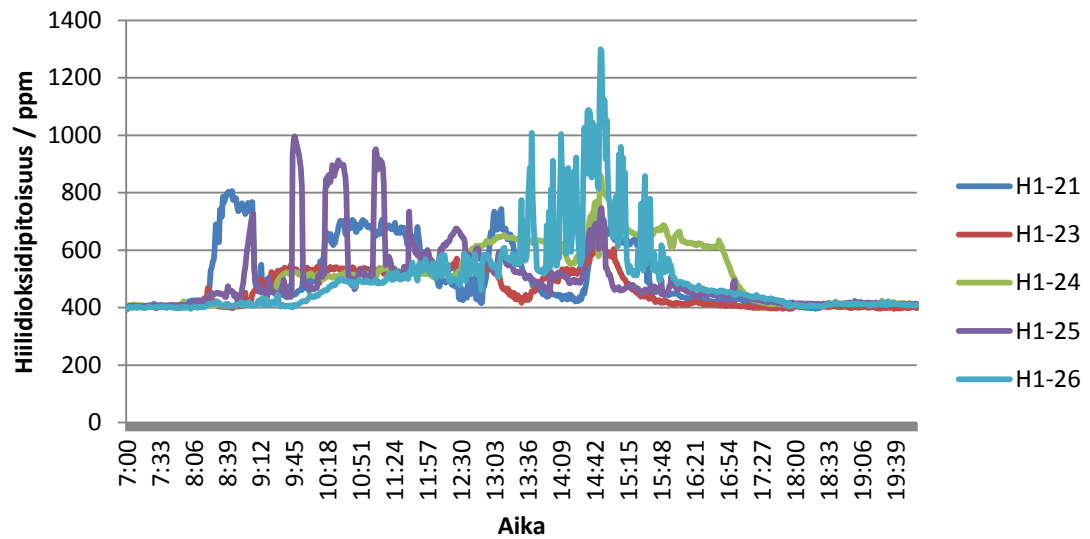
- Sesko ry. (2012). SFS-EN 50491-4-1: Osa 4-1: Yleiset toiminnallisen turvallisuuden vaatimukset rakennusten elektronisiin järjestelmiin (HBES) ja rakennusautomaatio- ja ohjausjärjestelmiin (BACS) integroitaville tuotteille. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SETI Oy. (2015). SETI Oy verkkosivut: RAU - rakennusautomaatiourakoitsijan hyväksyntä. Haettu 3.1.2015 osoitteesta <http://www.seti.fi/index.php?k=20800>
- SFS. (2010). SFS-EN 12464-1: Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS. (2012). SFS-EN 15232: Rakennusten energiatehokkuus. Rakennusautomaation, säädön ja kiinteistönhoidon vaikutus energiatehokkuuteen. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Sähkötieto ry. (2001). ST13.31: Rakennuksen sähköverkon ja liittymän mitoittaminen. Sähkötieto ry.
- Tampereen kaupunki. (2013). Rakennusautomaatiojärjestelmän suunnitteluohje. Tampereen kaupunki. Saatavissa (viitattu 2.1.2015): http://www.tampere.fi/tilakeskus/material/JZx7LP7ys/Rakennusautomaatiojarjestelma_suunnitteluohje_200813.pdf
- Tampereen kaupunki. (2014). Tampereen tilakeskuksen verkkosivut: Suunnitteluohjeet. Saatavissa (viitattu 11.1.2015: <http://www.tampere.fi/tilakeskus/rakennuttaminen/suunnitteluohjeet.html>
- TeliaSonera Finland Oyj. (2014). Sonera verkkosivut: Alerta Pro. Saatavissa (viitattu 5.1.2015): <http://www.sonera.fi/yrityksille/tuotteet+ja+palvelut/liiketoimintapalvelut/halytys+ja+etahallintapalvelut/alerta+pro>
- Tiilikainen, S., Manner, J. (2013). Suomen automaatioverkkojen haavoittuvuus. Tutkimusraportti. Raportti. Aalto yliopisto.
- Tilastokeskus. (2013). Rakennukset pääasiallisen lämmitysaineen mukaan 2012. Tilastot. Tilastokeskus.
- TTY, LUT, VTT. (2010). INCA - Interaktiivinen asiakasliityntä ja sen hyödyntäminen sähköjärjestelmän hallinnassa ja energiatehokkuuteen kannustavissa palveluissa. Tutkimusprojektin loppuraportti.
- Uusitalo, S. (28. 10 2014). Helen verkkosivut: Yritykset ja kotitaloudet voivat toimia sähköreservinä. Saatavissa (viitattu 19.1.2015): <https://www.helen.fi/Uutiset/2014/yritykset-ja-kotitaloudet-voivat-toimia-sahkoreservina/>

- Yin, R. K. (2003). Case Study Research: Design and Methods (3th edition). Thousand Oaks. Sage Publication Inc.
- Ympäristöministeriö. (2011). Rakentamismääräyskokoelma osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- Ympäristöministeriö. (2011). Rakentamismääräyskokoelma osa D3: Rakennusten energiatehokkuus. Helsinki. Ympäristöministeriö.
- Ympäristöministeriö. (2014). Ympäristöministeriön verkkosivut: Uudistumassa olevat rakentamismääräyskokoelman osat. Saatavissa (viitattu 3.1.2015):
http://www.ym.fi/fi-fi/maankaytto_ja_rakentaminen/lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Valmisteilla_olevat_rakentamismaarayskokoelma_n_osat

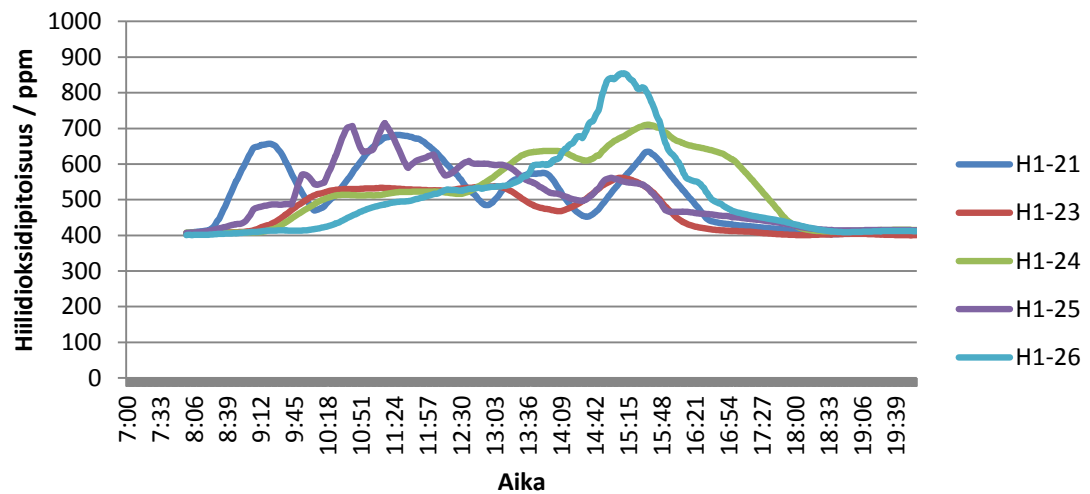
LIITE A: HIILIDIOKSIDIPITOISUUDET, 15 MINUUTIN PYSÄYTYS



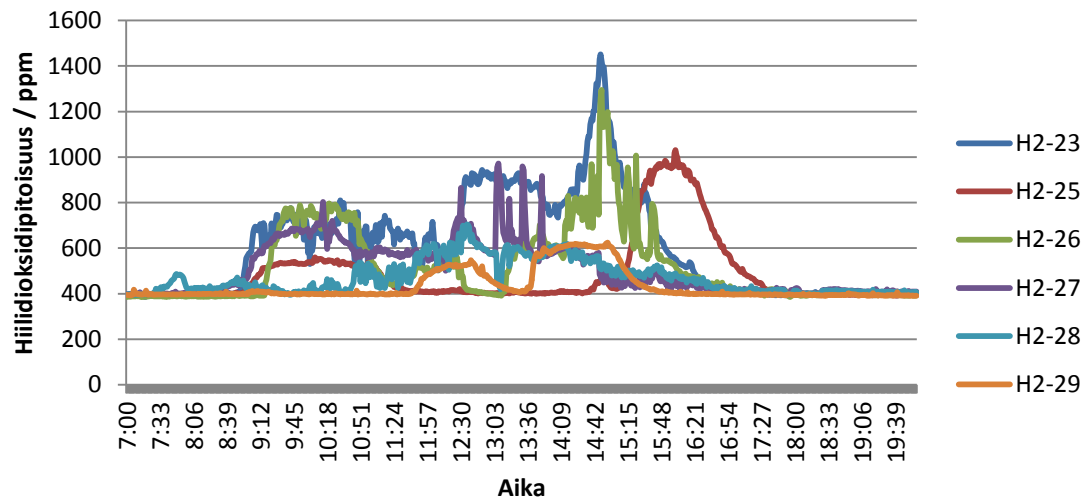
Hiilidioksidipitoisuudet 1.krs 1.12.2014



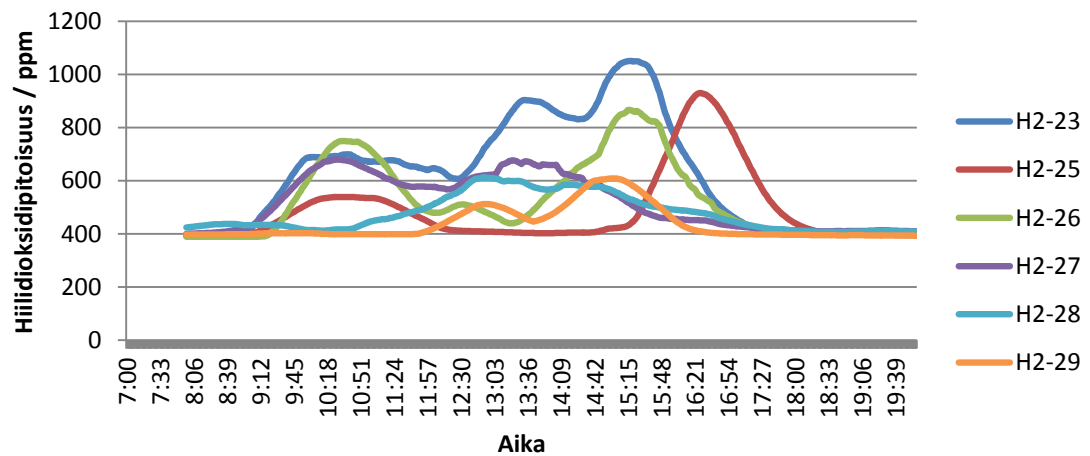
Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 1. kerros 1.12.2014



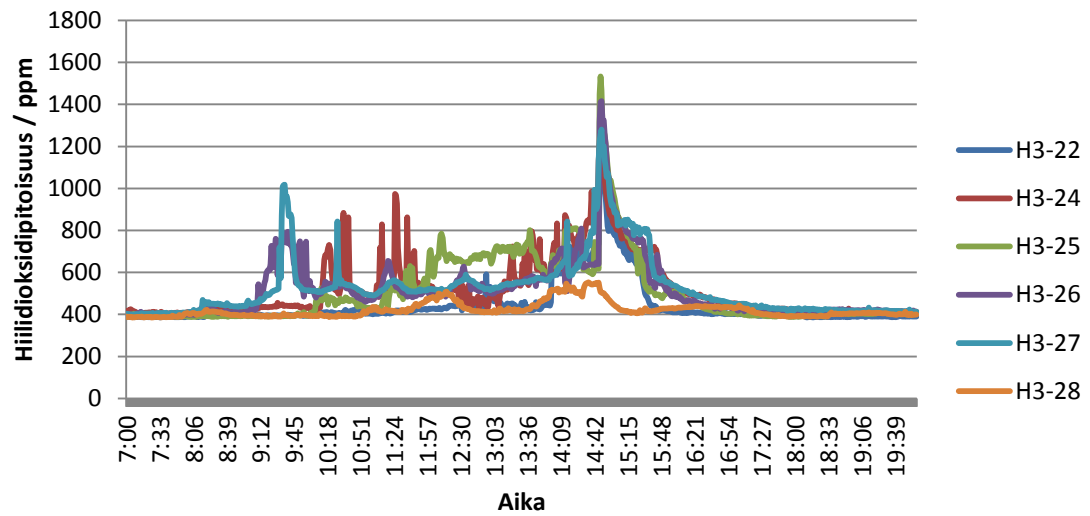
Hiilidioksidipitoisuudet 2.krs 1.12.2014



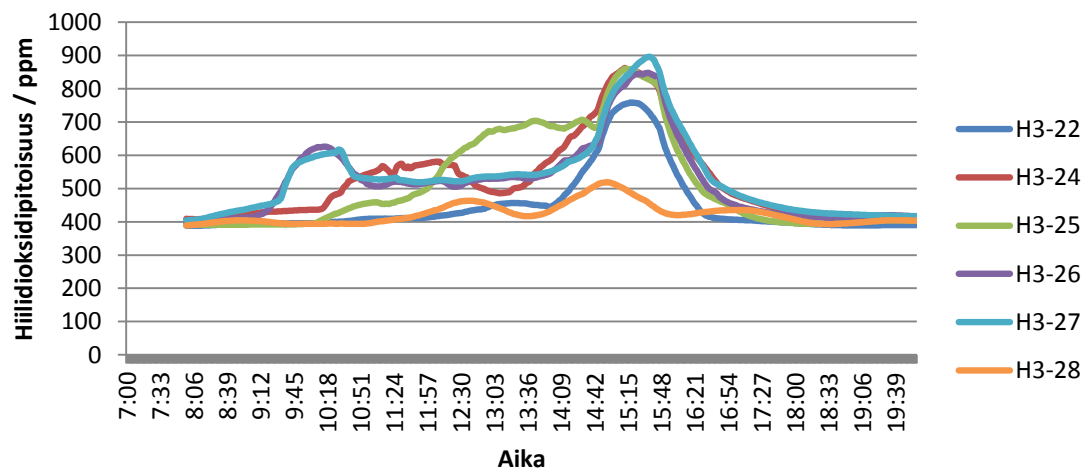
Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 2. kerros 1.12.2014



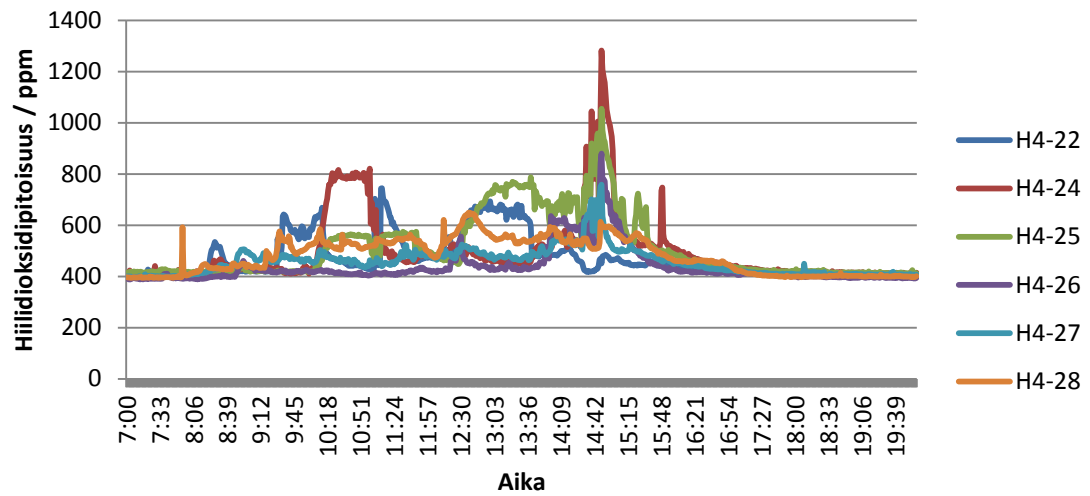
Hiilidioksidipitoisuudet 3.krs 1.12.2014



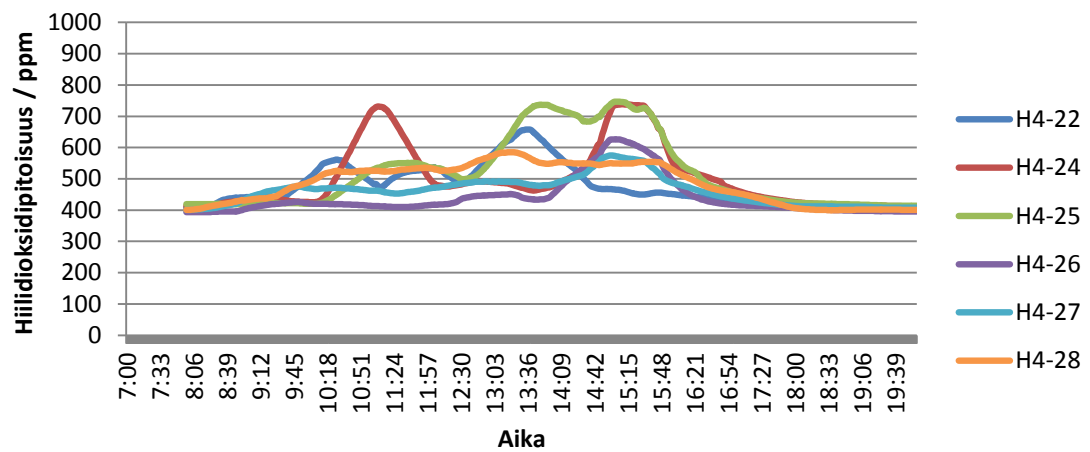
Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 3. kerros 1.12.2014

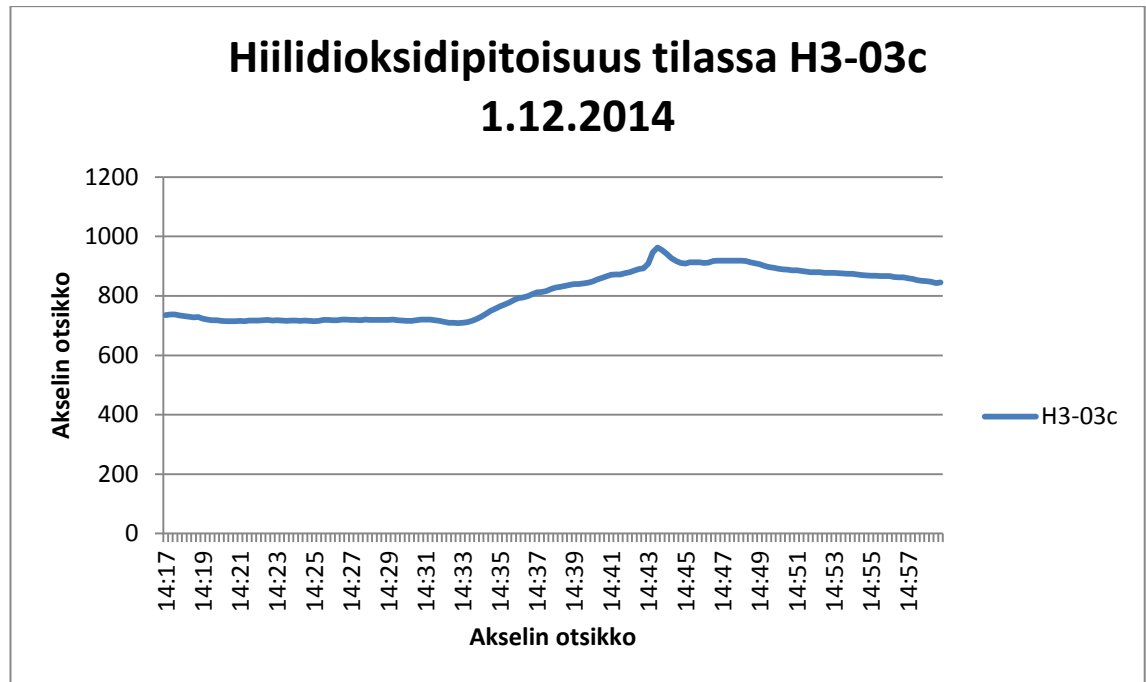


Hiilidioksidipitoisuudet 4.krs 1.12.2014

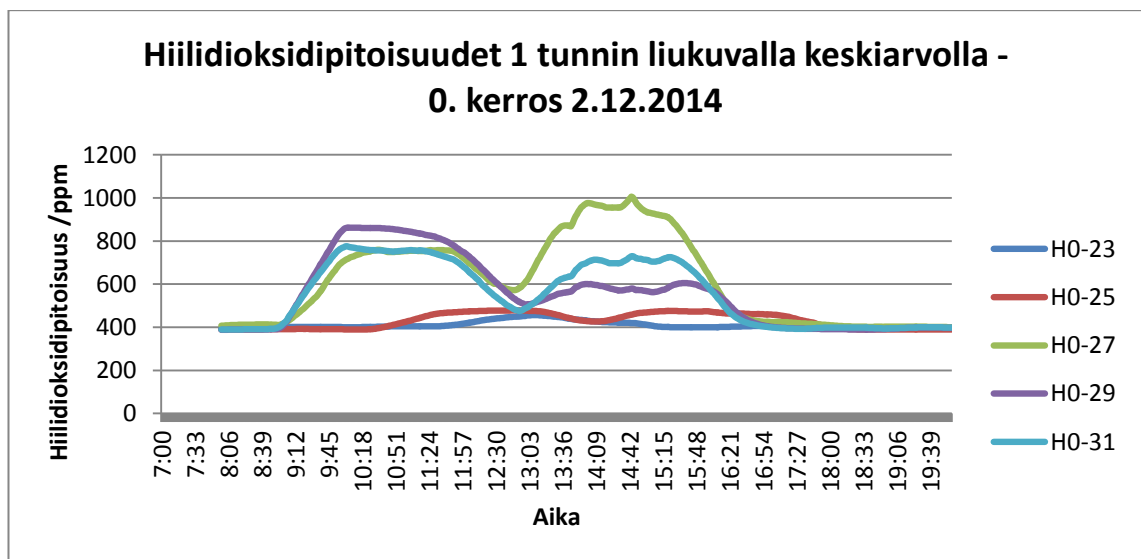
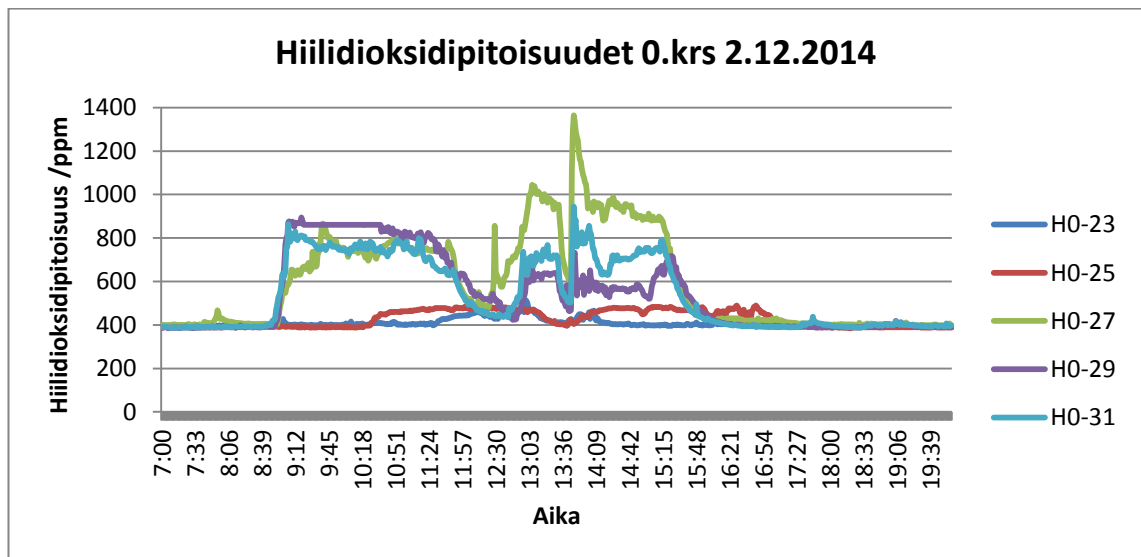


Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 4. kerros 1.12.2014

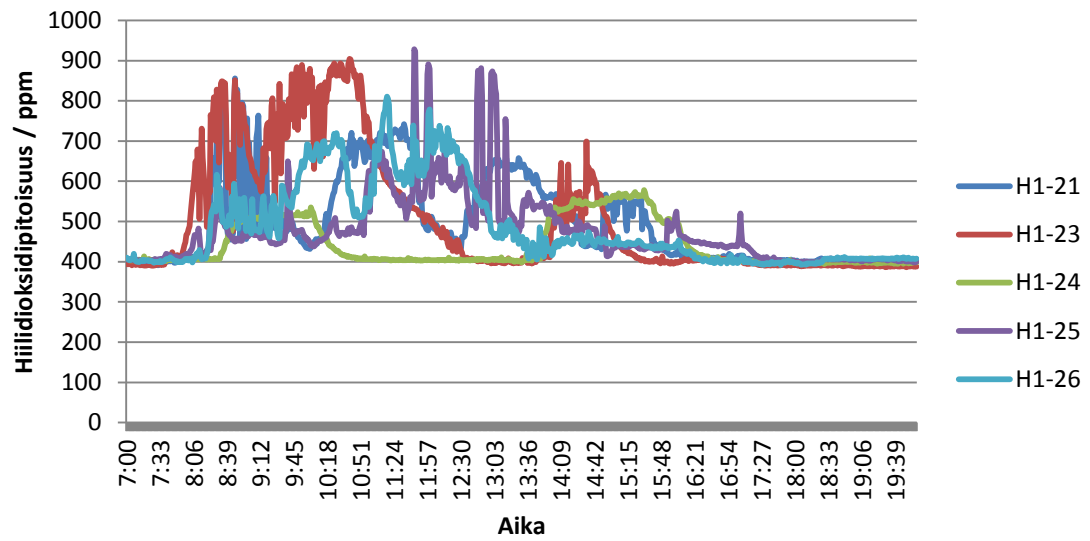




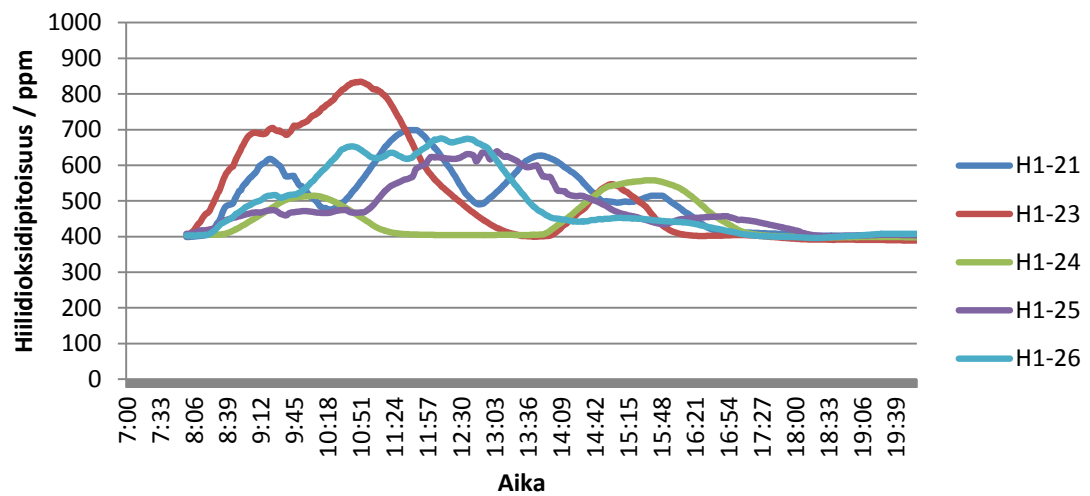
LIITE B: HIILIDIOKSIDIPITOISUUDET, 15 MINUUTIN PUDOTUS OSAILMAMÄÄRÄLLE



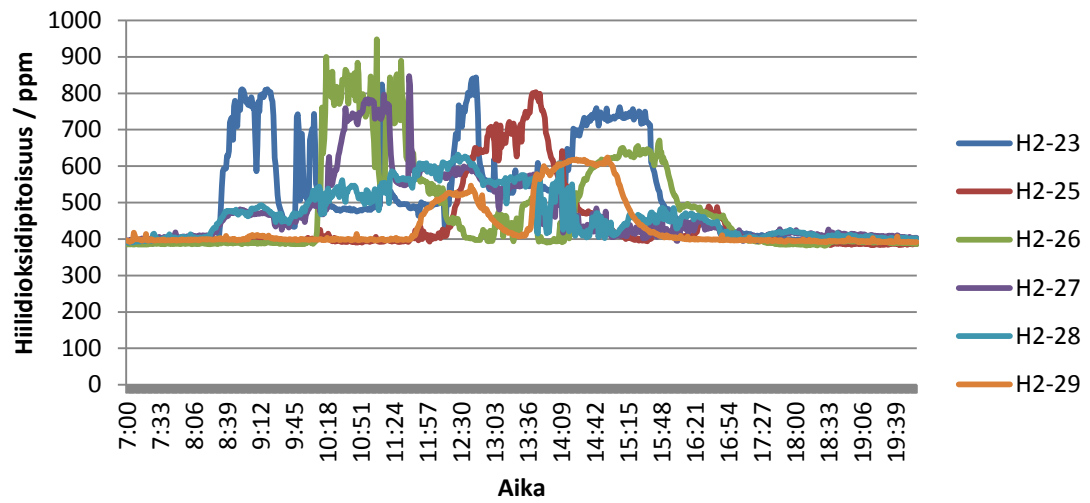
Hiilidioksidipitoisuudet 1.krs 2.12.2014



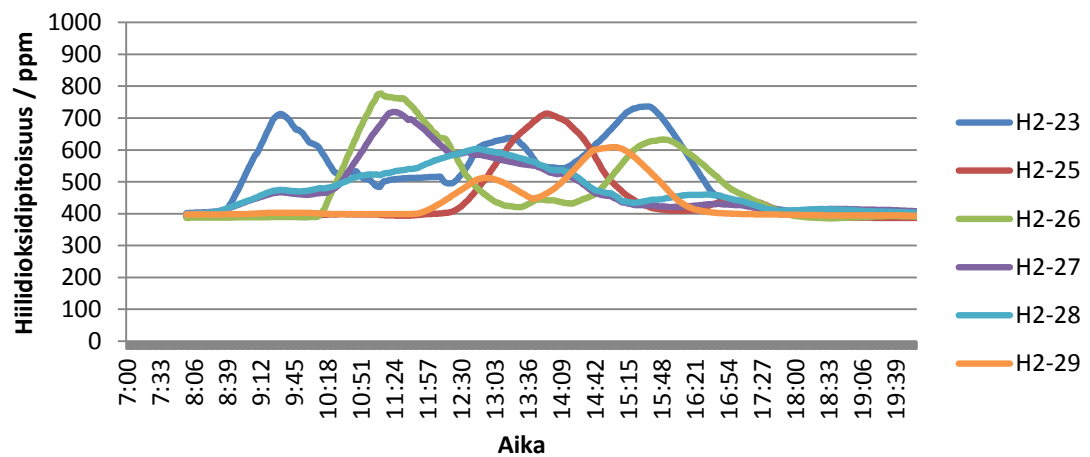
Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 1. kerros 2.12.2014



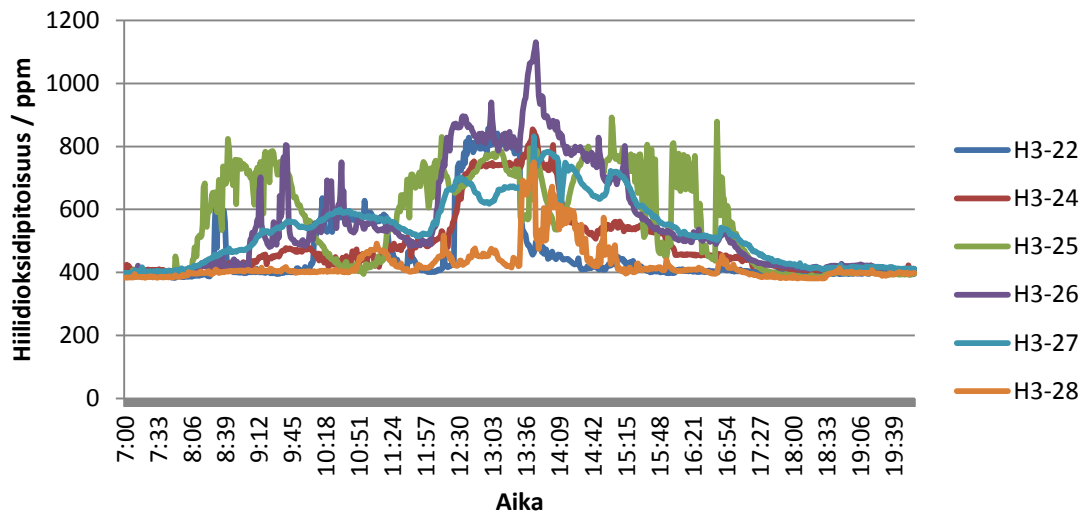
Hiilidioksidipitoisuudet 2.krs 2.12.2014



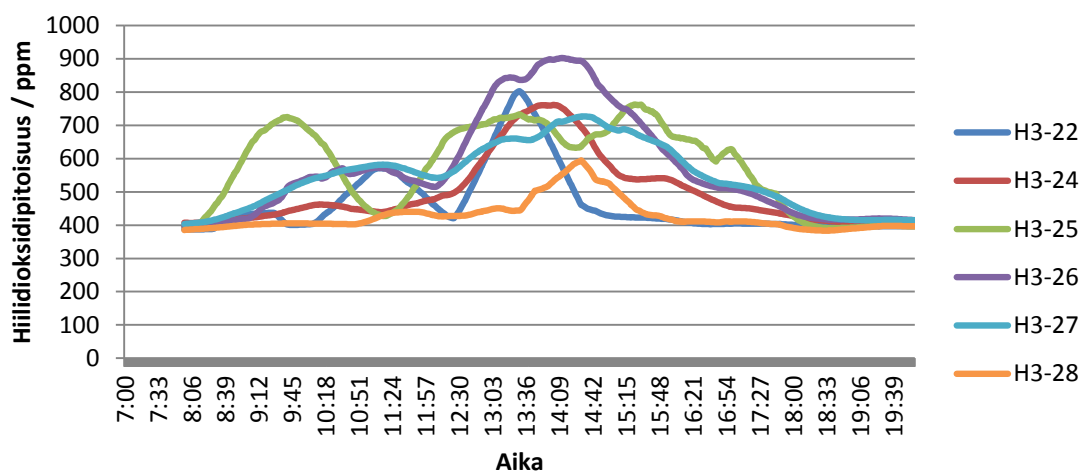
Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla 2. kerros 2.12.2014



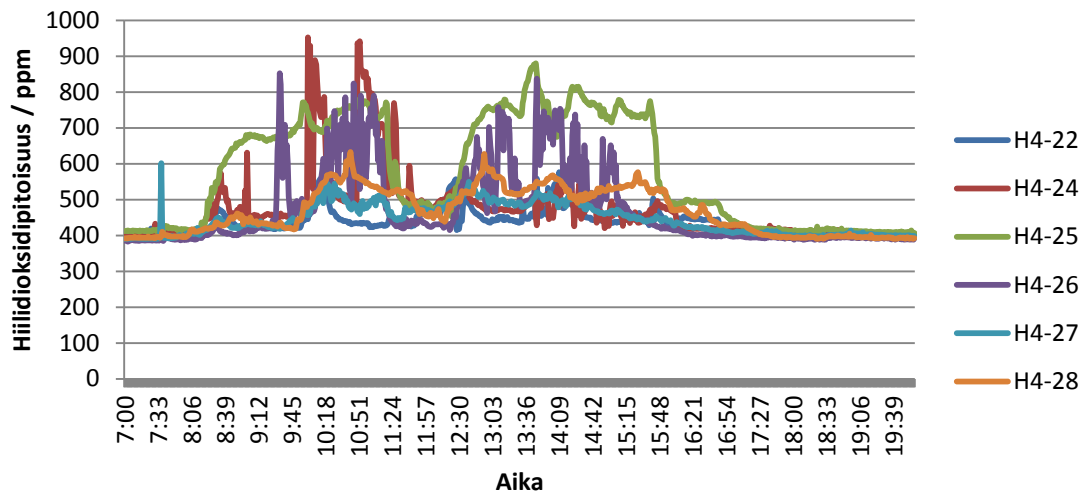
Hiilidioksidipitoisuudet 3.krs 2.12.2014



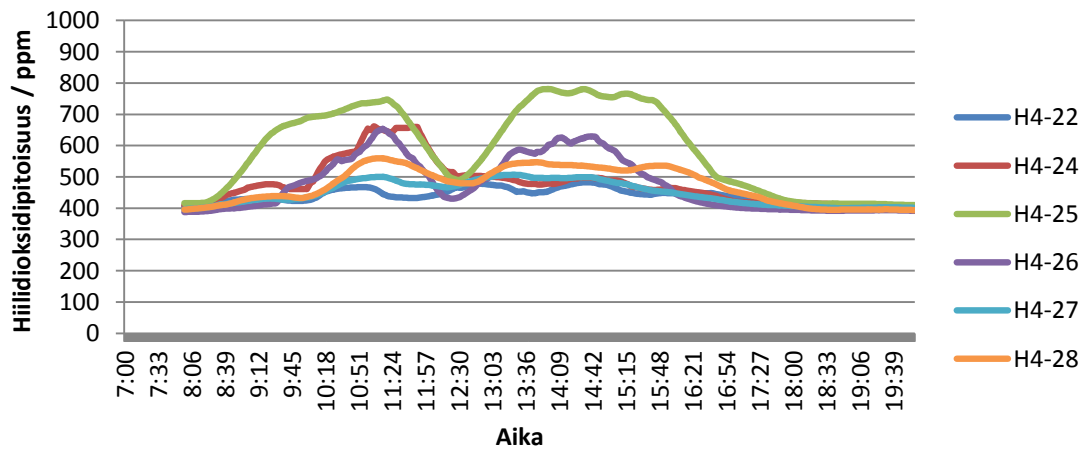
Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 3. kerros 2.12.2014

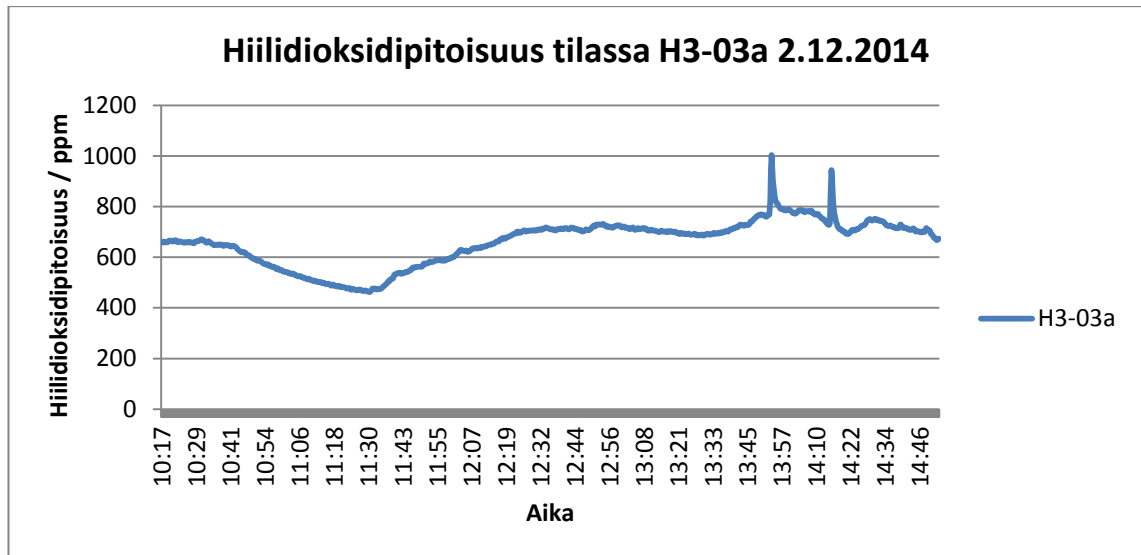


Hiilidioksidipitoisuudet 4.krs 2.12.2014



Hiilidioksidipitoisuudet 1 tunnin liukuvalla keskiarvolla - 4. kerros 2.12.2014





LIITE C: VALAISTUSKOKEEN KYSYMYSLOMAKE

VALAISTUSTUTKIMUS

Hei!

Tutkimme käyttäjien kokemuksia **tämän tilan valaistuksesta kuluneen oppitunnin ajalta**. Toivoisimme, että vastaisit lyhyesti muutamaan alla olevaan kysymykseen.

Huom! Tämä kysely liittyy vain **tämän tilan valaistukseen tämän oppitunnin ajalta**, ei rakennuksen valaistukseen yleisesti!

Merkitse sopivin vastausvaihtoehto

KYSYMYKSET:

1. Tilan valaistusvoimakkuus tunnin aikana oli mielestäsi riittävä

1	2	3	4	5
täysin eri mieltä	jokseenkin eri mieltä	ei samaa eikä eri mieltä	jokseenkin samaa mieltä	täysin samaa mieltä

2. Tilan valaistusvoimakkuuden taso muuttui epätavallisesti tunnin aikana (ei koske valaistustilanteiden muutosta, kuten videotykin käyttöä)

1	2	3	4	5
täysin eri mieltä	jokseenkin eri mieltä	ei samaa eikä eri mieltä	jokseenkin samaa mieltä	täysin samaa mieltä

3. Jos huomasit valaistusvoimakkuudessa muutoksia, kuinka häiritsevästä tätä pidit? (asteikolla 1-5)

1	2	3	4	5
ei muutosta	hieman häiritsevä			erittäin häiritsevä

4. Entä miten valaistusvoimakkuus mielestäsi muuttui?

1	2	3	4
ei muutosta	pienemmäksi	suuremmaksi	sekä että

5. Jos olet huomannut valaistusvoimakkuuden muuttuvan häiritsevästi oppitunnin aikana, merkitse aikajanaalle arvio mihin aikaan tunnista tämä mielestäsi tapahtui? (jätä merkkeamatta mikäli et kokenut häiritsevä muutoksia)

Merkitse arvio aikajanaan:



Kiitos vaivannäöstä!

